

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NESTABILITA ŘEZU PŘI DĚLENÍ MEZNÍCH TLOUŠTĚK PLECHŮ LASEROVÝM PAPRSKEM

UNSTABILITY CUT OF LASER BEAM AT DIVIDING LIMITING GAUGE THICKNESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ZDENĚK KADLEC

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA

BRNO 2007

**ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá možnostmi řezání silných ocelových plechů pomocí laseru a problémy, které při řezu vznikají. Jejich technologickým zkoumáním a řešením. Metodika řešení spočívá ve výzkumu interakce laserového svazku s materiálem v závislosti na poloze ohniska a následné řešení vneseného tepla. Cílem je zjistit z celkového hodnocení vzorků a matematického popisu, které parametry řezného procesu mají největší vliv na výskyt efektu širokého řezu, případně i na kvalitu výrobků a následnou optimalizaci těchto veličin.

**Klíčová slova**

Laserové řezání, CO<sub>2</sub> laser, laserový svazek, vnesené teplo, interakce svazku s materiálem, vlastnosti materiálu

**ABSTRACT**

This thesis deals with the possibilities of cutting strong steel metal sheets by means of laser and problems rising from the incision, their technological investigation. The basic philosophy consists on the research of the interaction between laser bunch and material, depending on the position of focal point and sequential results in spec. heat. It determines the main parameters of the incision (from the total quantities and mathematical description) which have the biggest effect on the occurrence of wide cut and perhaps even on the quality of products and consequential optimization of these quantities.

**Key words**

Laser cutting, CO<sub>2</sub> laser, laser beam, spec. Heat, key-hole, interaction laser with material, material properties

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KADLEC, Zdeněk. *Nestabilita řezu při dělení mezních tlouštěk plechů laserovým paprskem: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 84 s., 8 příloh. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Nestabilita řezu při dělení mezních tlouštěk plechů laserovým paprskem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2008

.....  
Zdeněk Kadlec

## **Poděkování**

Děkuji tímto RNDr. Liboru Mrňovi Ph.D., Ing. Karlu Osičkovi, Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady. Dále Milanu Rusiňákovi, Miroslavu Škárovi, Jarmile Houdkové za pomoc při zpracování vzorků v rámci vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah .....	7
Úvod .....	9
1 TECHNOLOGIE LASEROVÝCH SYSTÉMŮ .....	10
1.1 Obecný fyzikální princip laseru .....	10
1.1.1 Bohrov model .....	10
1.1.2 Fotony a energie .....	11
1.1.3 Spontánní a stimulovaná emise .....	12
1.1.4 Rezonátor, populační inverze .....	13
2 ROZDĚLENÍ LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ .....	14
2.1 Základní rozdělení .....	14
2.2 Pevnolátkové lasery .....	15
2.2.1 Rubínový laser .....	15
2.2.2 Nd: YAG laser .....	15
2.3 Plynové lasery .....	16
2.3.1 CO <sub>2</sub> laser .....	17
2.3.2 Excimerový laser (e-lasery) .....	19
2.4 Polovodičové lasery .....	19
3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM SVAZKEM .....	20
3.1 Aplikační obory .....	20
4 PARAMETRY LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ .....	23
4.1 Strojní parametry .....	23
4.2 Laserové parametry .....	26
4.3 Procesní parametry .....	28
4.3.1 Laserové plynné médium .....	28
4.4 Parametry obrobku .....	30
4.4.1 Typy a vhodnost materiálů .....	30
4.4.2 Materiálové charakteristiky .....	32
5 METODIKA LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ .....	36
5.1 Druhy řezných procesů .....	36
5.2 Mechanismus vytvoření řezné spáry .....	37
5.2.1 Vznik paroplynového kanálu .....	37
5.3 Penetrace svazku do materiálu .....	39
6 VÝPOČET CHARAKTERISTICKÝCH PROPORCÍ ŘEZU .....	40
6.1 Vstupní parametry .....	41
6.1.1 Laserové řezací zařízení .....	41
6.1.2 Experimentální materiál .....	42
6.2 Výpočet parametrů laserového svazku .....	44
6.2.1 Měření polohy ohniska vůči materiálu .....	46
6.2.2 Výpočet profilu svazku .....	47
6.3 Výpočet rozložení intenzity energie laserového svazku .....	47
6.4 Výpočet vneseného tepla do řezu .....	51
6.5 Diagnostika reálného laserového svazku .....	57
6.6 Princip proudění plynu v řezné spáře .....	62

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	65
7.1 Šířka řezné spáry .....	66
7.2 Skluz – n, rozteč skluzových rýh – w, linie na materiálu- m .....	66
7.3 Odchylka kolmosti nebo odchylka úhlu- u .....	67
7.4 Průměrná výška prvků profilu, Rz <sub>5</sub> .....	68
7.5 Tepelně ovlivněná oblast (HAZ) .....	68
7.6 Ostatní parametry.....	69
8 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ .....	74
Závěr.....	76
Seznam použitých zdrojů .....	77
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	81
Seznam příloh .....	84

## ÚVOD

Název Laser vznikl složením počátečních písmen anglického výrazu popisující jeho princip „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ což znamená zesilování světla pomocí stimulování emise záření.

Základní myšlenky, ze kterých laser vychází, začínají v 19. století, kdy se objevuje na scéně anglický fyzik James Clerk Maxwell s velmi úspěšnou teorií elektromagnetického pole (dnes známy jako Maxwellovy rovnice), z níž mimo jiné plyne, že světlo je elektromagnetické vlnění o velmi malé vlnové délce. Další poznatek učinil německý fyzik Max Planck s revoluční myšlenkou kvantování energie elektromagnetického záření, která dává později základ kvantové fyzice. Při dalším studiu kvantových vlastností předpověděl Albert Einstein (1879-1955), že za určitých okolností může dojít k tzv. vynucené, neboli stimulované emisi. Pak by bylo možno „donutit“ atomy při přechodu z vyšší energetické hladiny k vyzáření přebytečné energie vhodným fotonem zvenčí. Výsledkem by bylo, že slabý světelný impuls vyvolá vznik světla mnohem silnějšího. Psal se však teprve rok 1917. Teorie, ani technické možnosti nedovolovaly tuto myšlenku uvést do praxe.

Dalšího úspěchu se dočkali vědci v tehdejší Sovětské svazu a ve Spojených státech. V roce 1954 vznikly v moskevském Fyzikálním ústavu akademie věd SSSR (Nikolaj Gennadijevič Bassov a Alexandr Nikolajev Prochorov) a na Kolumbijské univerzitě v New Yorku (Charles Hard Townes) první kvantové generátory mikrovlnného záření, tyto byly roku 1960 patentovány a roku 1964 udělena Nobelova cena. V roce 1962 byl i v Brně zkonstruován první československý čpavkový laser. Tyto přístroje byly prvními skutečnými předchůdci laseru nazývané maser a jeho využití bylo mimo jiné jakožto nejpřesnější hodiny (tzv. atomové hodiny) s teoretickou odchylkou jedné vteřiny za několik miliónů let. Od čpavkového maseru už byl jen krůček k sestrojení kvantového zesilovače, pracujícího místo mikrovln se stimulovanou emisí světla. Do cíle se jako první dostal Theodore Maiman. V prvním laseru byl použit rubínový krystal. Krátce po prvním rubínovém laseru začalo vznikat mnoho dalších typů. Lišily se nejen aktivním prostředím, ale i způsobem buzení, výkonem a dalšími vlastnostmi a parametry. Lasery našly od dob jejich objevení uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti a postupně se vyvíjejí i nové obory, jako je laserová medicína nebo holografie. A tak se postupně stává laser běžným společníkem v komunitě lidí. (1,2)

# 1 TECHNOLOGIE LASEROVÝCH SYSTÉMŮ

## 1.1 Obecný fyzikální princip laseru

Lasery jsou zařízení, která produkují intenzivní paprsek světla, který proto aby mohl fungovat jako nástroj musí mít následující vlastnosti:

- a) Monochromaticnost (všechny světelné vlny mají stejnou vlnovou délku)
- b) Koherence (všechny světelné vlny jsou navzájem ve fázi)
- c) Nízká divergence (světelné vlny jsou takřka dokonale paralelní – paprsek se rozbíhá pouze ve velmi malém stupni)
- d) Hustota energie je mnohem větší než u konvenčního světla

Termín "světlo" je všeobecně znám jako elektromagnetické záření v rozsahu od 1 nm do 1000  $\mu\text{m}$  vlnové délky. Viditelné spektrum přibližně (400-700) nm. Vlnová délka v rozsahu od 700 nm do 10  $\mu\text{m}$  je považována za blízkou infračervenému záření (NIR) a cokoliv nacházející se za ní představuje vzdálené infračervené záření (FIR). Naopak, (200-400) nm je nazývané ultrafialové záření (UV). Pod 200 nm je hluboké ultrafialové záření (DUV). (1,2)

### 1.1.1 Bohrov model

V roce 1915, Neils Bohr navrhl model atomu. Tento jednoduchý model se stal základem pro kvantovou mechaniku. V Bohrově modelu elektrony obíhají jádro atomu a mají omezený počet pevných oběžných drah, které jsou k dispozici pro elektrony. Dle pravidel může elektron jít z jeho základního stavu (nejnižší energetická oběžná hladina) k vyššímu (excitované neboli vybuzené) hladině, nebo může spadnout z vyšší hladiny k nižší, ale nemůže zůstat mezi jednotlivými hladinami. Dovolené energetické stavy jsou nazývány „kvantovými“ stavy a jsou uvedené hlavními kvantovými čísly 1,2,3 atd. (3)

Elektron k tomu, aby přeskočil na vyšší kvantový stav, musí atom přijmout energii z okolního systému. Tento proces bývá označován jako „čerpání“. Čerpání může nastat různými mechanismy, např. nepružné srážky s ostatními atomy a pohlcení energie ve formě elektromagnetického záření. Jsou-li vybuzené atomy schopné emise na určité vlnové délce, potom po vstupu záření stejné vlnové délky dojde indukci k přechodu elektronů na nižší hladinu, což je provázeno uvolněním energie (tzv. **EMISE**) fotonů stejné energie, buď jako kinetickou práci (nezářivé přechody) nebo jako elektromagnetické záření (zářivé přechody). (1,3)



### 1.1.2 Fotony a energie

Většinou se světlo projevuje jako vlnění, ale za určitých okolností má světlo kvantový charakter a projevuje se jako proud částic energie (elektromagnetické záření), které byly nazvány fotony. Dochází ke změnám doprovázeným přenosem energie mezi podsystémy, tj. atomy, molekulami nebo ionty a elektromagnetickým polem.

Každý foton má vnitřní energii určenou rovnicí kde:

$h$  je Planckova konstanta =  $6,626\,075 \cdot 10^{-34}$  J·s.

$c_0$  představuje rychlost světla ve vakuu =  $299\,792\,458$  m·s

Vnitřní energie fotonu (4)

$$\begin{aligned} E_F &= h \cdot f \\ \lambda \cdot f &= c_0 \\ E_F &= \frac{h \cdot c_0}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Je-li v daném případě vlnová délka  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  a frekvence  $f = 600$  Hz

Tab. 1.1 Výsledné hodnoty energie fotonu

frekvence $f$	Vnitřní energie fotonu $E_F$	$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J
$f = 4,23 \cdot 10^{14}$ Hz	$E_F = 2,80 \cdot 10^{-19}$ J	$E_F = 1,75$ eV

Je evidentní z této rovnosti, že delší vlnová délka světla = nižší energie fotonu. Důsledkem toho, ultrafialové světlo je mnohem víc „energetické“ než infračervené světlo. (4)

Pro světelnou energii k tomu, aby způsobila čerpání elektronu ze základního energetického stavu  $E_0$  k vyššímu energetickému stavu  $E_m$ , se musí energie jednotlivých fotonů rovnat energetickému rozdílu mezi dvěma stavy, tedy  $(E_0 - E_m = h \cdot f = E_F)$ . Příliš mnoho nebo málo energie a foton bude pohlcen. Obsazení energetických hladin se řídí pomocí Boltzmannova rozdělení, který určuje rovnovážný stav soustavy. Jsou i vícestavové systémy nejčastěji pak 3 a 4 hladinový např. u  $\text{CO}_2$  laseru. Důležitou roli zde sehrává teplota soustavy  $T_s$ . S jejím nárůstem bude poměr  $(N_0/N_m)$  narůstat (vyšší energie soustavy). (1,5)

$(N_0/N_m)$  je poměr počtu částic na různých energetických hladinách

$k$  – Boltzmannova konstanta =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup>

Boltzmannovo rozdělení energie (3)

$$\frac{N_0}{N_m} = \exp \left[ - \frac{E_m - E_0}{k \cdot T_s} \right] \quad (1.2)$$

Po čerpání nastává porušení rovnovážného stavu a elektron ve vybuzeném energetickém stavu se musí nakonec rozložit a snížit úroveň zpět na nižší nebo základní hladinu, protože je v nestabilním stavu kdy  $N_m > N_0$  a v tomto stavu může setrvat pouze krátkou dobu. Sestup může být vykonán jedním z následujících dvou jevů. (3,5)

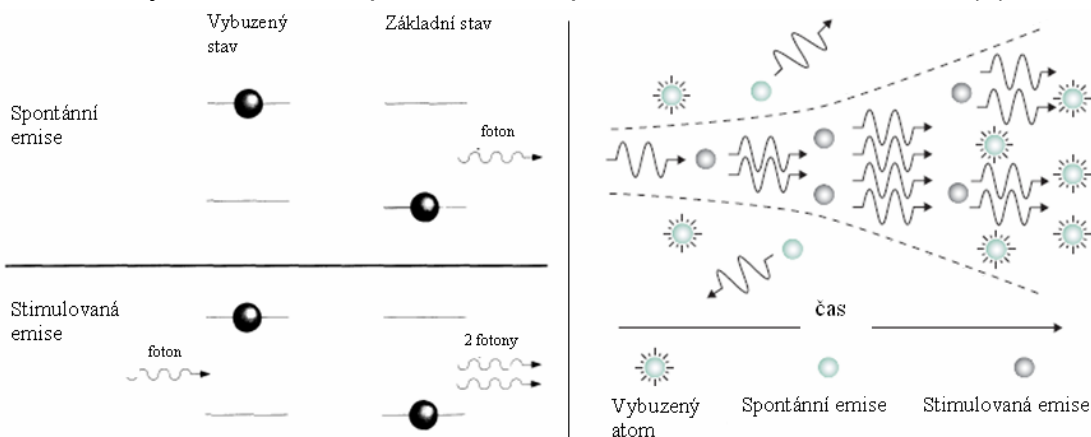
### 1.1.3 Spontánní a stimulovaná emise

V obou případech se jedná o zářivý přechod. Uvolní-li se nezávisle na venkovním působení, záření v náhodném směru a náhodné fázi, amplitudě je tato skutečnost nazývaná samovolná **spontánní emise**. Příkladem zářivého přechodu je LED dioda, zářivka, žárovka. Příkladem nezářivého přechodu je ohřívání těles při absorpci slunečních paprsků. (5)

Jestliže však elektron je ve vyšším energetickém stavu  $E_m$ , a jeho cesta úpadku je  $E_0$ , ale nemá energii na samovolný rozklad, dopadne na něj foton jehož energie přesně odpovídá energetickému rozdílu mezi původním a vzbuzeným stavem atomu ( $E_m - E_0$ ). Dopadající foton stimuluje vzbuzený atom k návratu na původní hladinu a k vyzáření fotonu ve vhodné aktivní látce, který má stejné vlastnosti (frekvenci a fázi) jako dopadající. Výsledkem jsou dva stejné fotony. Tento proces je nazývaný **stimulovaná** nebo také **vynucená emise**. (2,3)

Chování atomů lze přirovnat k elektrickému dipólu. Je-li na tento dipól působeno elektromagnetickým polem letícího fotonu nastane stav, kdy fáze a frekvence dipólu a pole jsou stejné a dipól uvolní foton koherentní s původním. Pro skupinu atomů, pokud bude čas dostatečně dlouhý a pravděpodobnost pro vynucenou emisi 100 %, pak nově nastupující stimuluje foton se ovlivní s prvním atomem, způsobující vynucenou emisi souvislého atomu. Tyto dva fotony pak působí společně na další dva atomy v linii atd. Na konci procesu, pak bude jedenáct souvislých fotonů, všechny s identickými fázemi a veškerý pohyb bude ve stejném směru. (3,5)

I přes tento kontinuální jev není samotná stimulovaná emise dostačující k vytvoření laserového svazku. Další podmínkou pro vznik a udržení stimulované emise popř. následné zesílení je zapotřebí zavést populační inverzi a systému získat zpětnou vazbu prostřednictvím rezonátoru. (5)



Obr. 1.1 Spontánní a stimulovaná emise (3)

### 1.1.4 Rezonátor, populační inverze

#### Populační inverze

Představuje nutnou podmínkou, aby docházelo k zesilování světla. Nastává v okamžiku kdy  $N_m > N_0$ . Tento jev není stabilní, neboť jeho stabilita by vyžadovala existenci záporné teploty. Prochází-li médiem, ve kterém je dosaženo inverzní populace záření vhodné frekvence (fotony vhodné energie), dojde k značnému zesílení záření, neboť pravděpodobnost spontánní emise je asi o 10 řádů nižší než stimulované emise. Nastane zesilovací „lavinový“ efekt, který je omezován ztrátami – rozptyl, absorpce fotonů v aktivní látce atd. (1,5)

#### Rezonátor

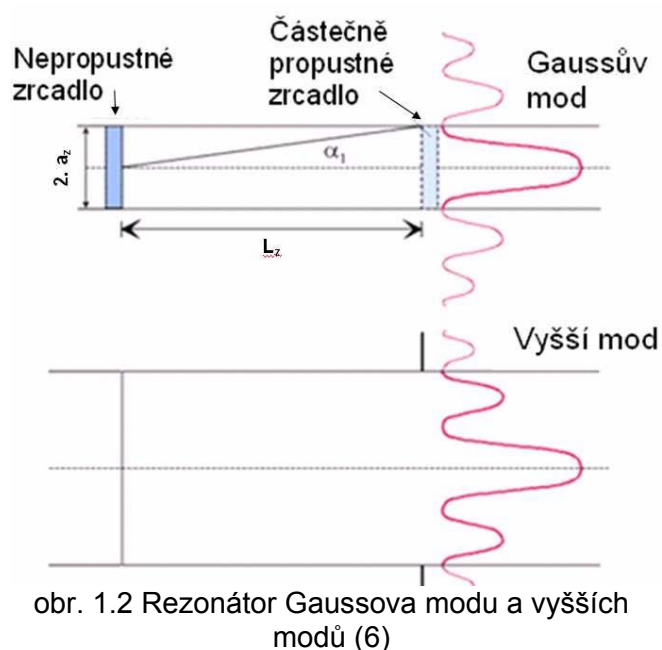
Ačkoli s populační inverzí můžeme zesílit signál přes vynucenou emisi, celkový jednorůchodový zisk je dost malý, a většina vybuzených atomů v populaci vysílá spontánně a nepřispějí k celkovému výkonu. Je zapotřebí mechanismus - rezonátor pozitivní odezvy neboli zpětnovazební. Je složen ze systému konkávních nebo konvexních zrcadel, která odrážejí nevhodné fotony (mimo osu) ven ze systému a žádoucí fotony (na ose) zpět do vybuzené populace, kde mohou být znovu zesíleny, mezi nimi je aktivní látka. První zrcadlo je nepropustné a na povrchu nejčastěji napařované stříbrem. Druhé zrcadlo je polopropustné napařované germaniem. (5,6)

Jestliže střed křivosti jednoho ze zrcadel leží mezi druhým zrcadlem a jeho středem křivosti, pak se jedná o rezonátor stabilní v opačném případě o nestabilní. (5)

Vzdálenost zrcadel je  $L_z$  a pokud platí podmínka, že úhel uzlu intenzity získaného difrakcí v úzkém otvoru  $\alpha_1$  se shoduje s okrajem vnějšího zrcadla, pak se předpokládá vygenerování Gaussovského svazku. Zavádí se zjednodušující Frenselovo číslo  $N$ : Pokud je menší než 1 předpokládá se Gaussův model

$$N = \frac{a_z^2}{\lambda \cdot L_z} \quad (1.3)$$

$a_z$  je poloměr zrcadel uvnitř rezonátoru. (6)



obr. 1.2 Rezonátor Gaussova modu a vyšších modů (6)

## 2 ROZDĚLENÍ LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ

Všechny lasery pracují na stejném principu (stimulované emisi), ale velmi výrazně liší se svou konstrukcí i specifickými vlastnostmi. Ze širokého sortimentu existujících laserů jsou pro aplikace ve strojírenských technologiích rozšířené jen některé, ale v jistých případech je laser jediným řešením a neexistuje ekvivalentní zpracování (letectví, medicína..). (1)

### 2.1 Základní rozdělení

Pro rozdělení laserů do skupin lze zvolit různá kritéria, ale nejběžnějším je toto:

- Dle skupenství aktivního prostředí: pevnolátkové, kapalinové, plynné, polovodičové (laserové diody)
- Dle vlnové délky: submilimetrové, infračervené, v oblasti viditelného světla, ultrafialové, rentgenové
- Dle čerpání aktivní látky: optickým zářením, elektrickým polem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem atd.
- Dle počtu energetických hladin: dvou, tří a více hladinové
- Dle režimu práce: pulzní, kontinuální (CW) – lasery

Ačkoliv se třídy neustále doplňují a mění s realizací nových laserů, rozdělení dle skupenství aktivního prostředí je víceméně universální.

Lasery pro technologické aplikace nejčastěji: CO<sub>2</sub> lasery až do 20kW

Nd:YAG lasery (7,8)

Tab.2.1 Přehled základních typů laserů (9)

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
<b>Pevnolátkové</b>				
Rubínový laser	Krystalický rubín	694,3 nm	červená	holografie
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	infračervená	chirurgie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μm	infračervená	stomatologie
<b>Plynné - Atomární</b>				
Hélium-neon laser	hélium, neon	633 nm	zelená, červená	zaměřování poloh
<b>Plynné -molekulární</b>				
CO <sub>2</sub> laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	infračervená	sváření, řezání
Excimerové lasery	ArF, KrCl, XeCl, XeF	193 - 351 nm	ultrafialová	oftalmologie
<b>Polovodičové</b>				
Galium-Arsen laser	Ga;As	840 nm	červená, IR	laserová tiskárna

## 2.2 Pevnolátkové lasery

Za pevnolátkové lasery (dielektrické) jsou označovány opticky čerpané iontové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří pevná opticky propustná látka - matrice – krystalické nebo amorfní izolanty s příměsí vhodných iontů (aktivačních prvků). Generované vlnové délky pokrývají viditelnou a infračervenou oblast. (8)

Výhody: jsou schopny pracovat ve všech možných režimech a jsou velmi flexibilní, stabilní, nenáročné na údržbu a provozní podmínky, jsou robustní.

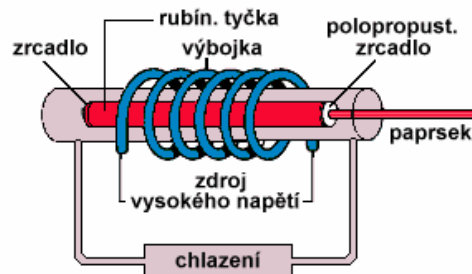
Do této skupiny spadá: rubínový ( $\lambda=694\text{nm}$ ), Nd:YAG ( $\lambda=1064\text{nm}$ ),  
Nd:YLF, Er:YAG Ho/CTH:YAG laser.

Nejpoužívanější maticové látky: sklo, umělý korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), fluorit ( $\text{CaF}_2$ ),  
keramika, oxysulfidy, fosfáty, silikáty,  
beryláty atd.

Nejpoužívanější aktivátory: prvky skupiny železa (Cr, Ni, Co) a  
lanthanoidy (Nd, Sm, Gd, Yb, atd.) (1,10)

### 2.2.1 Rubínový laser

Základním představitelem této skupiny je prvotní červeně zářící rubínový laser, jehož aktivní prostředí tvoří safír s příměsí chrómu-krystalický syntetický rubín, který objevil Theodore Maiman a představoval první laser (Californie r.1960). Buzení atomů na vyšší energetickou hladinu se provádělo krátkými světelnými záblesky výbojky. Aktivní látkou jsou ionty trojmocného chrómu  $\text{Cr}^{3+}$  a buzení je xenonovou výbojkou. Výstupní svazek může být nepolarizovaný nebo lineárně polarizovaný podle orientace krystalu vůči optické ose laseru. Užívaný byl pro vrtání a bodové svařování. (2,7,10)



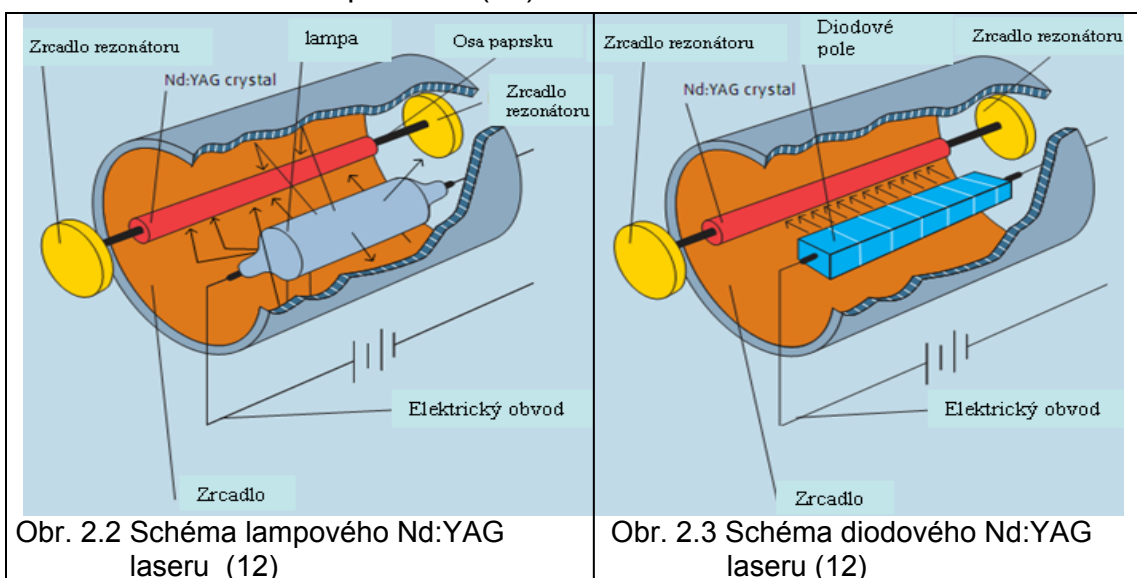
obr. 2.1 Schéma rubínového laseru (2)

### 2.2.2 Nd: YAG laser

Nejrozšířenějším a dnes nejlépe technicky zvládnutým představitelem je laser neodymový označovaný Nd:YAG podle zkratky anglického názvu „yttrium aluminium garnet“. Tedy jeho aktivním prostředím je neodym  $\text{Nd}^{3+}$  umístěný v krystalu yttrium-aluminium granát  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , který je obvykle ve tvaru tyčinky umístěné mezi dvěma zrcadly (viz.obr.2.2). Optické excitace u impulsních laserů je všeobecně pomocí kryptonových lamp.

U kontinuálních vysokovýkonných tzv. CW laser laserech jsou užívány kryptonové obloukové lampy a pro výkony nad 1 kW pak excitace pomocí diod (viz obr. 2.3). Generuje neviditelné infračervené záření na vlnové délce 1064 nm. (5,11)

Tento laser našel bohaté uplatnění jak v průmyslu, tak i medicíně a vědě. Je vhodný pro vrtání, svařování, řezání a popisování. Dále se používá v radarové technice a ve spektroskopii. Lampy mají omezenou životnost od několika set hodin až po moderní, které převyšují 10 000 provozních hodin dle režimu provozu. (12)



## 2.3 Plynové lasery

Aktivním prostředím jsou plyny, nebo směsi plynů a par. Pracují v kontinuálním (CW od mW až desítky kW) i pulzním režimu (stovky W).

Výhody: mají vysokou účinnost až (30% u CO<sub>2</sub> laseru), homogenita aktivního prostředí se odráží v kvalitě svazku a nízké divergenci.

Nevýhody: jistou nevýhodou je relativně malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí, proto jsou výkonné plynové lasery značně rozměrné (10,12)

Do této skupiny patří: helium-neonový laser, měděný laser, jódový laser, argonový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerové lasery a CO<sub>2</sub> lasery. (10,13)

Nejznámějším a současně prvním vyrobeným plynovým laserem je (He-Ne) hélium-neonový laser, používán např. měřicí technice.

### 2.3.1 CO<sub>2</sub> laser

V technologii opracování materiálů se používají především CO<sub>2</sub> lasery pro řezání a svařování. Čistý oxid uhličitý lze vybudit pouze slabě, proto už v počátcích vývoje bylo zjištěno, že největší výkon dává plynná směs složená z Héliu-He, který plní funkci zabezpečení disipace (rozptylu) tepla. Dále N<sub>2</sub> v kterém plynný výboj vytváří energii potřebnou pro excitaci a ze samotného CO<sub>2</sub>. (5,11)

způsob excitace: pomocí elektrického výboje v zředěném plynu  
příčné buzení elektrickým výbojem („transverse excitation atmospheric“ TEA CO<sub>2</sub> lasery)  
elektronovým svazkem (EIL)

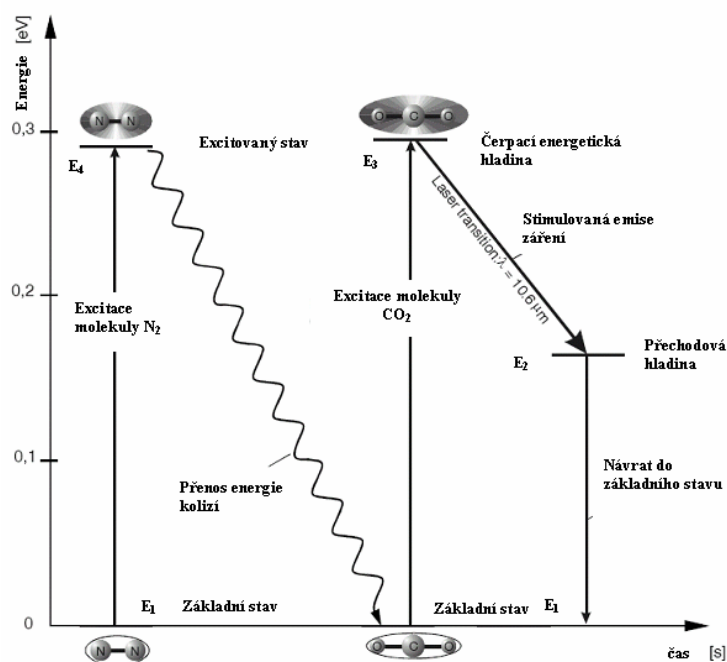
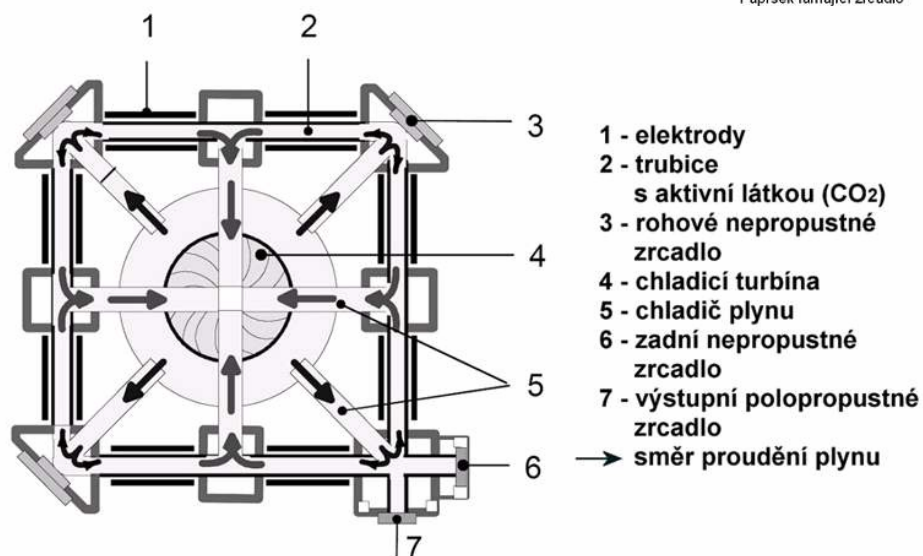
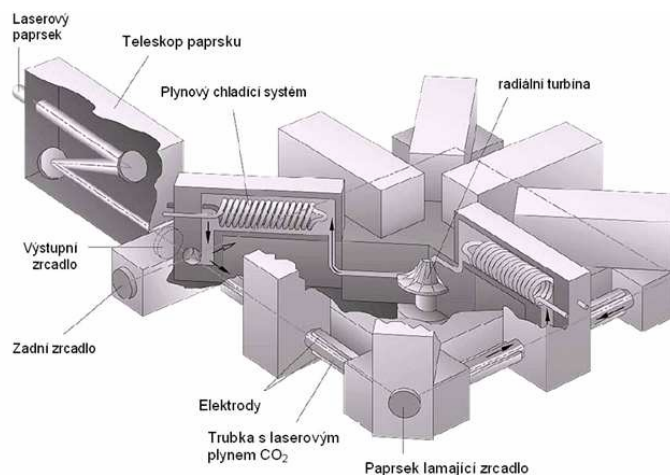
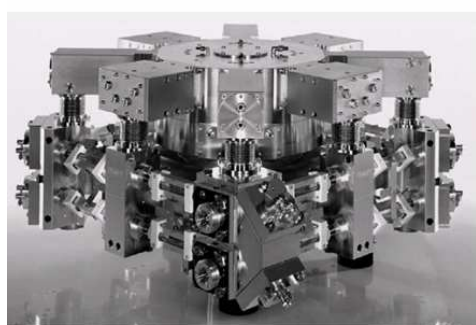
Rozdělení: lasery s výbojkou (30 W·m<sup>-2</sup>)  
lasery s pomalým průtokem plynu  
lasery s rychlým průtokem plynu (podélný nebo příčný)

#### Princip činnosti:

Molekula CO<sub>2</sub> je lineární tříatomová a může při excitaci kmitat třemi způsoby: podélně symetricky, asymetricky a příčně. Tomu odpovídají kmitočty 42 [THz], 70 [THz] a 20 [THz]. CO<sub>2</sub> pracuje v 4 hladinovém systému. Excitovaný stav dusíku lze snadno získat srážkami s elektrony, přitom tento stav má dlouhý život, což zajišťuje dobrý přenos energie na neexcitované molekuly CO<sub>2</sub> rezonančním nebo elastickým procesem na hladinu E<sub>3</sub>. K vyzaření molekuly dojde při přechodu molekuly z asymetrických kmitů na symetrické na vlnové délce 10,6 μm. Vyzaření fotonu je realizováno při přechodu molekuly CO<sub>2</sub> z hladiny E<sub>3</sub> na hladinu E<sub>2</sub>. Aby nedošlo při kontinuálním vyzařování ke snížení inverze je nutné zajistit návrat molekul CO<sub>2</sub> z hladiny E<sub>2</sub> na základní hladinu E<sub>0</sub>. Pro návrat molekuly CO<sub>2</sub> do základního stavu se používá hélium, které odnímá oxidu uhličitému excitační energii a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazuje aktivní prostředí laseru. Největší potíže tvoří vznikající oxid uhelnatý (vzniklý rozpadem CO<sub>2</sub>), který silně absorbuje záření a tím snižuje výkon. (14,15)

Lasery CO<sub>2</sub> se dělí dle proudění plynu na axiální proudění - používá se trubic zapojených opticky do série. Tento ještě pak může být s rychlým průtokem plynu, čímž se dosažitelný výkon zvýší až o 90 %.

Druhým typem je radiální proudění plynů. Zde je směs hnána dmychadlem přes chladiče napříč rezonátorem rychlostí až 60 m·s<sup>-1</sup>. Výboj mezi katodou a segmentovou anodou probíhá napříč proudem plynů i rezonátoru. Obě elektrody jsou vodou chlazené. (5,15)

Obr. 2.4 Princip CO<sub>2</sub> laseru (15)Obr. 2.5 Schéma činnosti CO<sub>2</sub> laseru-radiální proudění (15)



- Výhody: účinnost se pohybuje okolo 10 – 15 %.  
velký kontinuální výkon (až desítky kW) (13)
- Nevýhody: velká vlnová délka (10,6  $\mu\text{m}$ ), způsobuje velkou reflexi  
paprsku a větší rozměr stopy fokusovaného paprsku.

### 2.3.2 Excimerový laser (e-lasery)

Excimerové lasery byly vyvinuté kolem roku 1970. Název „excimer“ vznikl jako zkratka slov „excited“ a „dimer“, neboli excitovaná molekula, která tvoří aktivní prostředí tzv. excimer. Jsou to molekuly, které mohou existovat jen ve vybuzeném stavu, při návratu do základního stavu se rozpadnou na jednotlivé atomy. K vzniku excimerových molekul dochází při srážkách atomů plynů se svazkem elektronů o vysoké energii. Nejtypičtější plynovou náplní těchto laserů jsou kombinace halogenů a vzácných plynů, většina vyzařuje v ultrafialovém pásmu. (1,13)

Typy plynů :  $\text{F}_2$ , Ar F , Kr Cl, Kr F , Xe Cl, Xe F

Tyto impulzní plynové lasery se používají pro popisování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchů. (1)

## 2.4 Polovodičové lasery

Zdrojem záření je tzv. laserová dioda. Nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, nýbrž mají elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Aktivním prostředím je polovodičový materiál. (9)

Čerpání se zajišťuje elektrickým proudem tekoucím přes P-N přechod v propustném směru, kdy může dojít za vhodných podmínek k přeměně části elektrické energie na světlo. Polovodičové laserové diody o výkonu jen několik mW jsou součástí řady běžných zařízení, najdeme je v laserovém ukazovátku, laserové tiskárně, v přehrávačích disků CD atd. (9)

Typickými představiteli jsou: polovodičový laser buzený svazkem elektronů, injekční polovodičový laser

- Výhody: diody mají velmi malé rozměry, účinnost diod je vysoká (až 50 %), jejich výkon se dá snadno měnit (modulovat) změnou elektrického proudu
- Nevýhody: paprsek má větší divergenci než u jiných typů laserů  
Polovodičové lasery mohou mít výstupní výkon 30W až 6kW. U vysoce výkonných diodových laserů má vystupující paprsek tvar obdélníkové plochy. Polovodičové lasery se používají především pro svařování, tepelné zpracování a nanášení povlaků. (9,13)

### 3 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM SVAZKEM

Řezání laserem je stále relativně nová technologie. V roce 1981 následoval ohromný nárůst prodeje. Do konce 1990, vedoucí výrobci prodávali několik set laserových řezacích zařízení ročně. Řezání laserem nyní zaobírá zasloužené místo mezi dalšími řeznými technologiemi jako drátové řezání, vodní paprsek, řezání plazmou atd. Je nutno zvážit množství výhod které nabízí:

- Téměř každý tvar může být řezán použitím jediného nástroje
- Laser řeže materiál bez skutečného dotyku
- Jeden stroj může zpracovat širokou škálu materiálů (0,5 až 30) mm
- Řezání laserem je velmi precizní a rychlý způsob, při vzniku jen malé řezné spáry.
- Materiál blízko řezu je zahřátý jen mírně což zabraňuje částem tepelnou deformaci.
- Jestli jsou parametry stanovené optimálně, jsou řezné hrany kvalitní s minimální hrubostí a bez otřepů (není třeba dalšího opracování). (16)



Obr. 3.1 možnosti řezu (16)

#### 3.1 Aplikační obory

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí obrobku a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. (16)

Mezi základní oblasti, ve kterých se uplatňuje laser v průmyslu patří:

- ✓ zpracování plechů - řezání, svařování, vrtání
- ✓ obrábění - obrábění dutin, vrtání, obrábění s předehřevem, popisování
- ✓ tepelné zpracování - kalení, žíhání, popouštění, rázové zpevnění
- ✓ povrchové úpravy - nanášení různých druhů povlaků a sycení povrchu
- ✓ měření - délek, tvaru, polohy obrobku, měření jakosti povrchu
- ✓ renovace opotřebovaných součástí a nástrojů - navařování
- ✓ měření stavu napjatosti součástí - holografie;
- ✓ měření stavu opotřebení činné části nástroje
- ✓ vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech (10)

#### a) Gravírování (mikrofrézování) laserem

Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí (např. do forem pro vstřikování plastů a zápusťek), keramických materiálů, dřeva, gumy apod. Pro gravírování do kovových a keramických materiálů se používají především Nd:YAG lasery, pro gravírování do dřeva a gumy jsou vhodné CO<sub>2</sub> lasery. (10)

#### a<sub>1</sub>) Značení a popis laserem

Laser na povrchu materiálu s vysokou přesností vytváří stálý, mechanicky odolný a velmi kontrastní popis. Laserem je možné označovat všechny materiály, jako kalené i nekalené oceli a litiny, titan, hliník, keramiku, drahé kameny, plasty, dřevo, sklo, atd. Pro popisování se používají především Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 50 W, dále CO<sub>2</sub> lasery a excimerové lasery. Nově se pro popisování používají lasery vláknové. (10)

#### b) Tepelné zpracování

Tepelné zpracování materiálů laserem je charakterizováno krátkou dobou ohřevu a malým objemem ohřátého materiálu. Metody tepelného zpracování jsou založeny na:

ohřevu materiálu - žíhání, kalení a popouštění

odpařování materiálu - rázové zpevnění založené na mechanismu vypařování. Zpravidla se používá kontinuálních CO<sub>2</sub> laserů o výkonu několika tisíc wattů. Kalit lze vnější plochy, ale také např. drážku v díře, vnitřní dosedací plochy apod. (10)

#### c) Svařování laserem

Mezi výhody svařování laserem patří vysoká rychlost svařování, malé tepelné ovlivnění místa svaru, možnost provedení svaru i při přístupu pouze z jedné strany, malé nároky na jakostní povrch svařovaných součástí, vysoká pevnost svaru. Laserem je možné svařovat jinými metodami obtížně svařitelné materiály, jako titan a jeho slitiny, hliníkové slitiny (např. dnes v letectví a kosmonautice používanou slitinu hliníku a lithia). Ke svařování se používají Nd:YAG a CO<sub>2</sub> lasery. (10,17)

#### d) Vrtání laserem

Je založeno na odstraňování materiálu odpařováním. Intenzita svazku musí být vyšší než v případě sváření, a proto se pro tento účel používá impulsních laserů s délkou impulsu menší než 1 ms. První laserové vrtání bylo provedeno již v roce 1965, kdy byl rubínový laser použit pro vrtání otvorů v diamantových průvlacích pro tažení drátů. (10)

Pro vrtání laserem platí, že čím je otvor delší, tím více se odchyluje tvar od geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Délka vrtané díry může být až 50 mm. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodinek, filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů apod. Pro vrtání se používají:

CO<sub>2</sub> lasery - vyřezávání (kruhových i tvarových) otvorů, nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm, nejmenší průměr vrtaného otvoru je 0,2 mm

Nd:YAG lasery - vrtání děr o menším průměru, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm

excimerové lasery - vrtání děr do keramiky

V průmyslu se pro vrtání děr používají především Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W. (10)

#### e) Řezání laserem

Při laserovém řezání je snahou odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání kovů jsou to reaktivní plyny, jako např. kyslík. Dochází pak k exotermické reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a nerezové oceli. Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a dřevo, je přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo. (7,10)

Nejpoužívanější lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO<sub>2</sub> lasery se středním výkonem do 15 kW, kterými je možné řezat konstrukční oceli do tloušťky až 30 mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm. Laserem lze řezat např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a korozivzdorné oceli.

V přehledu je uvedena pouze část aplikací, kde se laser v současné době používá. U každé aplikace je ovšem vždy nutné zvažovat výhody použití této techniky ve srovnání s jejími nevýhodami, ke kterým patří vysoká pořizovací cena, nutnost kvalifikované obsluhy a převážně nízký koeficient účinnosti laserových systémů. Přesto platí, že využití laserů je v některých případech dnes už nezastupitelné a výzkum v aplikacích pokračuje dále. (10,17)

## 4 PARAMETRY LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ

### Jeden paprsek = Mnoho parametrů

Řezání laserem je komplexní proces ovlivňovaný četnými parametry. Řada parametrů je určena technickými daty laserového řezacího stroje. Ty které nejsou, musí být specifikovány a optimalizovány operátorem a programátorem. Důležité ovlivnitelné parametry jsou:

- **Strojní parametry** (ohnisková vzdálenost čoček, průměr trysky, profil a mód laserového svazku)
- **Laserové parametry** (výkon laseru a pracovní režim)
- **Procesní parametry** (řezná rychlost, typ a tlak plynu...)
- **Parametry obrobku** (tloušťka materiálu, struktura povrchu, geometrie, chemické složení) (16)

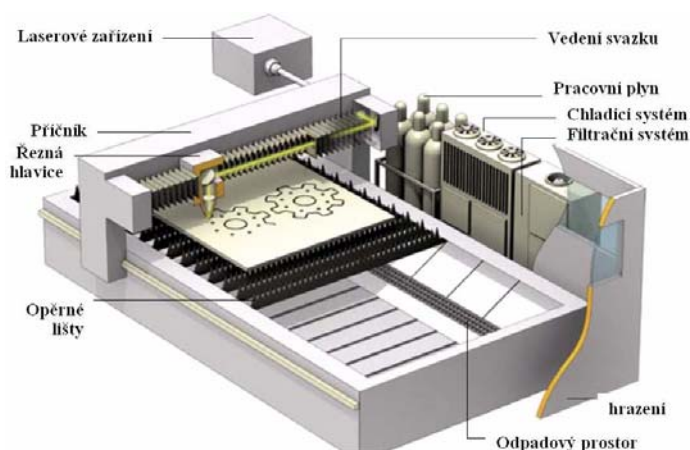
### 4.1 Strojní parametry

Laserový paprsek je vysoce kvalitní světelný paprsek vyžadující precizního doručení, aby se udržela jeho úroveň kvality. V laseru putuje paprsek několik metrů z laserové jednotky do řezné hlavice. Problém je to, že paprsek začíná divergovat

jak se vzdaluje ze zdroje. Způsoby jak nahradit tuto odlišnost je integrovat přizpůsobivé zrcadlo v trase paprsku. Jeho zakřivení může být upraveno a přizpůsobeno naprogramováním. Vlastnosti přizpůsobivého zrcadla vykonává dvě funkce. Nejprve udržuje stálou ohniskovou pozici skrz celou pracovní oblast a také umožňuje úpravu ohniskové pozice dle různých tloušťek materiálu. (15,16)

#### A) Čočky a ohnisková vzdálenost:

Čočky v řezné hlavici zaostřují a směřují laserový paprsek. Ohnisková vzdálenost čoček určuje ohniskový poloměr  $w_o$  a hloubku ohniska (tzv. hloubka pole). Typické ohniskové vzdálenosti čoček jsou v rozsahu od 3,75" do 10". 5" je užívána pro materiály do 3 mm a výkon laseru 5 kW. S 7,5" čočkou a větším ohniskovým průměrem pro zpracování větších tloušťek. Ohnisko je bod s největší hustotou energie. Po tomto bodu se



Obr. 4.1 Schéma řezacího zařízení (16)

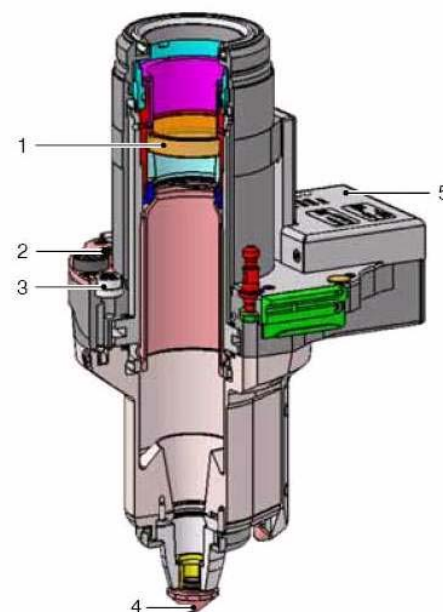
paprsek začíná prostírat a hustota energie klesá. Pro řezání plamenem je ohnisko umístěné těsně u povrchu materiálu. V obou případech optimální ohnisková pozice závisí na použitém materiálu. (15,16)

### B) Průměr trysky:

Průměr trysky určuje množství plynu vystupující z trysky a tvar průtoku plynu. Využívá se trysek s různými průměry (běžně mezi 0,6 mm až 3 mm), které se hodí pro použití s kyslíkem i dusíkem. (16)

### C) Řezná hlavice:

Zaostření laserového paprsku je provedeno buď čočkami nebo zrcadly. Zbývající distance od obrobku je (0,7-1,2) mm. Z řezné hlavice kromě svazku vychází také řezný nebo ochranný plyn s řízeným tlakem a bývá opatřena vnitřním chlazením vodou. CO<sub>2</sub> laserové světlo je plně pohlcené sklem, proto je nezbytné použít řezné hlavice opatřené čočkou zhotovenou ze zinku selenidu (ZnSe). Dnes jsou užívány pro výkon laseru 6 kW i více. V těchto případech je nezbytné, aby čočka byla dokonale čistá. Cizí tělíška na povrchu čočky absorbují laserové světlo a přemění na teplo a tím se mohou stát tak horké, že shoří. Moderní zařízení využívají monitorování stavu čoček prostřednictvím sondy případně jejich automatickou výměnu. (15)



1 - ZnSe čočka  
2 - Proud vzduchu  
3 - Řezný plyn (kyslík, dusík)  
4 - Řezná tryska  
5 - Elektronika

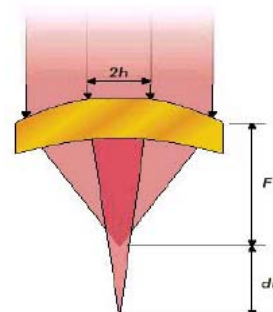
Obr. 4.2 Řezná hlavice (15)

Čím je větší průměr svazku v místě jeho dopadu na povrch materiálu při daném výkonu, tím menší hustotu energie v dopadové ploše získáme. Poklesne-li hustota energie pod kritickou hodnotu, nedojde k řezu. Tímto způsobem je pro daný laser omezena maximální řezatelná tloušťka konkrétního materiálu. (5)

### Optický systém *BIFOKALNÍCH* čoček -*Bifocal*

Bifocal spočívá v nahrazení standardních výstupních čoček speciální dvouohniskovou optikou (obr. 4.3) na běžných řezacích laserech. Bifocal lze bez potíží aplikovat téměř na všech laserech s následujícími efekty:

- větší tloušťka řezání při stejném výkonu



Obr. 4.3 Bifocal (18)

- vyšší rychlost řezání při stejné tloušťce
- usnadnění propalů materiálu

První ohnisko, získané z většího úhlu konvergence, je umístěné na povrchu materiálu, to dává dostatečnou energii na povrchu k zvýšení řezné rychlosti. Druhé získané z menšího úhlu konvergence, je umístěné na spodní straně materiálu, tak se vyhneme ořepům. (18)

Bohužel systém bifocal postavený na geniálním principu, nenachází ve světě uplatnění. Důvodem je nemožnost korekce a volby správných řezných parametrů pro obě ohniska a tím i špatná kvalita v horní nebo spodní části řezu. Dnes je tento systém vytlačován tzv. adaptivní optikou.

#### D) Profil laserového svazku

Pro začátek byl uvažován čistý laserový svazek, který má rovnoměrné rozložení intenzity a tedy pouze jedno maximum. Tento svazek se nazývá **Gaussův svazek** po svém objeviteli slavném německém matematikovi a fyzikovi Carlu Friedrichu Gaussovi. Gaussův zákon vycházel z Coulombova zákona elektrostatiky. (19)

Formulace Gaussova zákona:

„Tok elektrické intenzity  $\Phi_E$  libovolnou uzavřenou Gaussovou plochou  $S_G$  je přímo úměrný elektrickému náboji  $Q_N$  nacházejícímu se uvnitř této plochy“. Konstantou úměrnosti je převrácená hodnota permitivity vakua  $\epsilon_0$ .

Tok elektrické intenzity  $\Phi_E$  (19)

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E}_I \cdot d\mathbf{S}_G = \frac{Q_N}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

Z rovnice plyne, že pokud bude vektor elektrické intenzity  $\mathbf{E}_I$  kolmý k normálovému vektoru dané plochy  $S_G$  (případně části plochy), pak bude tok elektrické intenzity touto plochou nulový. S aplikací Gaussova zákona vznikne rovnice pro Gaussův svazek:

Komplexní elektrické pole amplitudy v prostoru (20)

$$E_{(r,z)} = E_0 \cdot \frac{w_0}{w_{(z)}} \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{w_{(z)}^2}\right) \cdot \exp\left[i\left(k_v z - \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{k_v \cdot r^2}{2R_{(z)}}\right)\right] \quad (4.2)$$

Zde  $k_v$  představuje vlnové číslo (vlnocet) a je rovno  $(2\pi/\lambda)$ . Druhý exponent vyjadřuje fázi ploché vlny. Pak lze z této rovnice určit konečně intenzitu elektrického pole v libovolném bodě v prostoru  $(r,z)$ . (20)

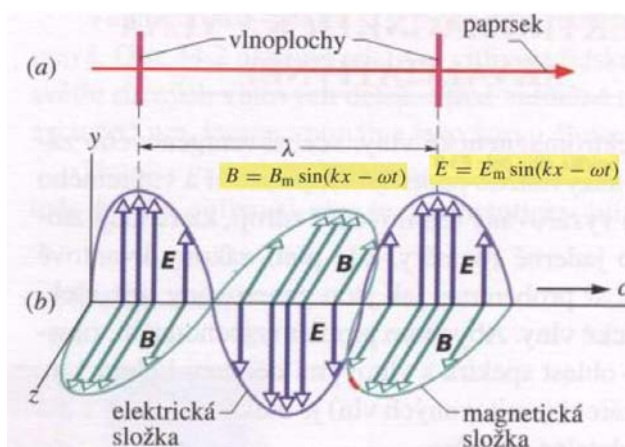
Intenzita elektrického pole (20)

$$I_{(r,z)} = \frac{|E_{(r,z)}|^2}{2 \cdot \eta} = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w_{(z)}}\right)^2 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{w_{(z)}^2}\right) \quad (4.3)$$

Model svazku je tak v každém bodě podél osy popsán dvěma funkcemi:  $R_{(z)}$  a  $w_{(z)}$ , s kterými je dále počítáno. (20)



### E) Mody, rozložení svazku



Obr. 4.4 Rozložení elektromagnetického pole ve vlně (19)

Při řezání je obzvláště důležitá kvalita paprsku. Proto se pracuje s vysoce fokusovaným základním módem (Gaussova křivka). Dnes až k výkonům kolem 2 kW. Lasery pro řezání s výkonem 3 kW a vyšším pracují již s vyšším módem. V optickém rezonátoru existuje elektromagnetické pole, které rozděluje amplitudu a fázi vlnění. Toto rozdělení pole ovliv-

ňuje transverzální elektromagnetický mód. Tento může být definovaný v kartézských souřadnicích ( $TEM_{mn}$ ) nebo v cylindrických ( $TEM_{pl}$ ). Indexy  $m, n$  představují počet minim na průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru. Ovlivňuje velikost centrického bodu a intenzitu soustředěného paprsku a tím řeznou kvalitu. (1,5)

TEM – zkratka označuje „transverse electromagnetic mode“

TEM00 se nazývá Gaussovský, neboť intenzita pole měřená kolmo k optické ose má Gaussovský průběh s jediným maximem v ose svazku.

## 4.2 Laserové parametry

### a) Výkon laseru:

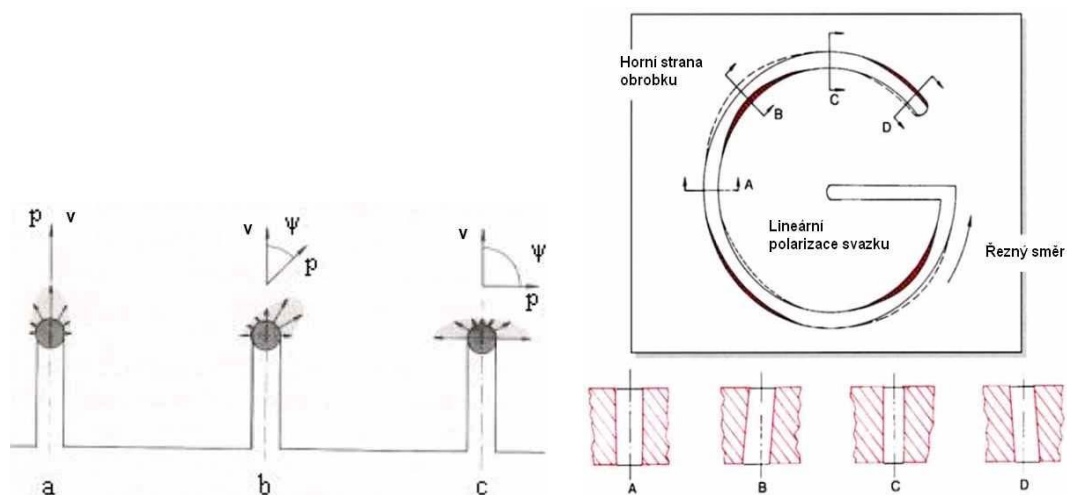
Výkon laseru je teplotní parametr celkové energie vydané ve formě laserového světla za sekundu. Intenzita laserového paprsku se rovná jeho výkonu dělené oblastí přes kterou je koncentrován. Vysoký výkon způsobí, že materiál je tak rychle ohřát, že čas který je k dispozici pro rozptyl do okolí je minimální. Také určuje tloušťku která může být ještě řezaná. Vyšších výkonů může být dosaženo použitím zaostřovacích čoček s kratší ohniskovou vzdáleností. (12)

### b) Míra polarizace:

Polarizace se odkazuje na směr v kterém světelné vlny oscilují v laserovém svazku. Při řezání kontur lineárně polarizovaným laserovým světlem budou výsledky různé v závislosti na směru: osciluje-li paralelně k řeznému směru, okraj bude hladký, nicméně osciluje-li kolmo jsou následně vyprodukované ořepy. Z tohoto důvodu je užíváno pro řez s CO<sub>2</sub> lasery, kruhově polarizované světlo. Materiál dobře absorbuje světlo v úhlu



ozáření známého jako Brewsterův úhel- $\psi$ , který spojuje polarizační rovinu „p“ a řezný směr „v“.  $\Psi=0^\circ \rightarrow$  přední část řezné spáry absorbuje větší energii než strany (ad.a obr. 4.5)  $\Psi=0^\circ \rightarrow$  přední část absorbuje menší energii než strany (b obr. 4.5). Proto řezná rychlost může být vyšší při řezu ve stejném směru jako polarizační rovina než při řezu ve směru k ní kolmém. Spotřeba energie je nesouměrná kdy  $\Psi=0^\circ - 90^\circ$  (c obr. 4.5). (20,21)



Obr. 4.5 Brewsterův úhel a lineárně polarizované světlo (21)

### c) Pracovní režim:

Lasery vysílají světlo ve dvou různých způsobech: buď jako kontinuální paprsek (CW-„Continuous Waves“) bez přerušení v průběhu času nebo jako krátké intenzivní pulzy. Parametry pulzního módu jsou síla pulzu (výkonová složka), šířka pulzu (doba interakce) a frekvence pulzů. (20)

#### **Pulzní režim:**

Výhody: Využití velké hustoty energie pulsu pro zvýšení absorpce záření v materiálech s velkou odrazivostí. Snížení objemového ohřevu materiálu při jeho zpracování laserem v důsledku krátké doby interakce. Špičkový výkon v krátkých pulzech zajišťuje účinné teplo s efektivním vyjmutím roztaženého materiálu ze spáry zatímco nízký průměrný výkon udržuje obrobek chladný. Některé lasery navíc mohou pracovat pouze v pulzním režimu (např. lampou pumpované Nd:YAG lasery).

Nevýhody: Výrazné snížení řezné rychlosti až na cca 10% oproti CW režimu a každý puls musí být dostatečně dlouhý (1–3) ms, aby natavil vrstvu řezné spáry. Tím se výrazně prodlouží čas řezání. (12,20)

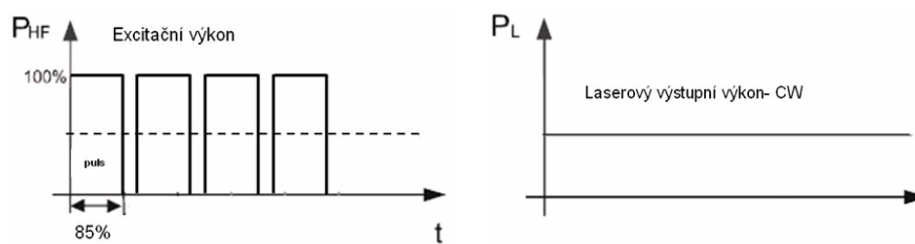
#### **Kontinuální režim:**

Výhody: Nejvyšší řezná rychlost může být získána ve vysokých hladinách výkonu CW režimové operaci. Maximální produktivní využití stroje.

**Nevýhody:** Problém tvoří místa kde stroj musí rychlost snížit jako jsou ostře rohy, složitá tvarová kontura - způsobuje zhoršení kvality řezu vlivem setrvačnosti a také stálým výkonovým poměrem. (12,20)

#### **Laser Duty cyklus:**

Jedná se o parametr popisující výkonové uspořádání činnosti v čase. Tato skutečnost umožňuje řešení složitých tvarů kde vlivem setrvačnosti dochází ke zhoršení povrchu součástí. Při udržování vysokého ozáření lze tak snížit tepelný vstup. (15)



Obr. 4.6 Duty 85% (15)

### **4.3 Procesní parametry**

Pro zajištění spolehlivého provozu vyžaduje laser zajištění dodávky značného množství vysoce kvalitních technických plynů. Jejich kvalita je posuzována prostřednictvím čistoty. (22)

#### **4.3.1 Laserové plynné médium**

Použití technických plynů u laserových zařízení se dělí do dvou oblastí :

- Laserové plyny (plyny pro generování laserového svazku v rezonátoru plynového laseru, případně směšovači)
- Asistenční plyny (aktivní plyny pro řezání, případně plyny plnící funkci ochranné atmosféry pro svařování)

**Čistota:** V definici čistoty bývá obvykle obsah nečistot uváděn v jednotkách *ppm* (parts per milion). Jde o výraz pro jednu miliontinu  $\text{ppm} = 0,0001\%$ . Čistota je také faktorem ovlivňujícím cenu a užitnou hodnotu technických plynů. Značení minimální čistoty plynu např. 4.6 znamená - číslo před tečkou udává počet devítek, číslo za tečkou poslední číslo v procentuelním označení čistoty. Údaj 4.6 označuje tedy plyn s minimální čistotou 99,996%. (22)

#### **a) Laserový plyn**

##### **✓ CO<sub>2</sub>:He:N<sub>2</sub>:**

Vytvářejí v laserovém rezonátoru CO<sub>2</sub> laseru vlastní prostředí pro vznik laserového svazku. Jedná se o směs plynů oxidu uhličitého, hélia a dusíku v poměru pohybujícím se okolo 5% CO<sub>2</sub>, 40% He, 55% N<sub>2</sub>. Větši-

nou jsou dodávány v jednotlivých láhvích, kde jejich směšování probíhá přímo v laseru. Některé CO<sub>2</sub> lasery a TEA lasery jsou zásobovány z láhví s premixovanou směsí plynů. Technický oxid uhličitý - 2.5 představuje běžnou čistotu a používá se např. jako ochranná atmosféra při obloukovém svařování. Oxid uhličitý - 4.5 je plyn s vyšší čistotou. (22)

### **B) Asistenční plyny**

Plyn je užíván pro vyfukování roztaveného kovu ven z řezu a také brání vniku vzduchu na řeznou hranu a tím oxidaci povrchu. Nejdůležitějšími parametry jsou čistota plynu, poměr a volba jednotlivých plynů, tlak pod kterým se toto médium dopravuje do řezu. (22)

#### ✓ **Kyslík-O<sub>2</sub>**:

Nejsledovanější nečistotou v kyslíku je vlhkost. Běžně používaný tzv. technický kyslík (vyskytuje se např. u autogenních operací) s označením 2,5 má obvyklou míru vlhkosti 30 ppm, zatímco u čistšího kyslíku 3.5 (doporučen při řezání konstrukčních uhlíkových ocelí) je hodnota vlhkosti více než 3x nižší. Obecně platí, že přítomnost molekuly vody v procesním plynu při řezání laserem snižuje celkovou účinnost procesu. (22)

Výhody: Reakce mezi kyslíkem a kovem ve skutečnosti vytváří dodatečnou energii ve formě tepla, které podporuje řezný proces. Tato dodatečná energie zvýší parametry procesu jako řezná rychlost a tloušťka obrobku. Druhá role je zásobovat smykovou sílu na hranici plyn/kapalina k tomu, aby vyhodila roztavený kov během řezného procesu. Tyto exotermní reakce jsou důvodem proč kyslík umožňuje penetraci silných a zrcadlicích materiálů. (22)

#### ✓ **Dusík-N<sub>2</sub>**:

Dusík je vhodný pro kovy s výjimkou titanu. Titan reaguje výbušně s oběma, kyslíkem i dusíkem, proto se zde používá argon. Nečistotami u dusíku se rozumí opět kyslík a vlhkost. Technický dusík 4.6, což je běžná čistota. Dusík 5.2 Premier je plyn s vyšší čistotou. Optimální čistota je 5,0 (99,9990 %). (22)

#### ✓ **Argon-Ar**:

Základní a často hlavní nečistotou v argonu je kyslík. U technického argonu čistoty 4.6 pro základní použití se obsah kyslíku pohybuje pod 5 ppm a u čistšího argonu 4.8 na oxidačně reaktivnější materiály je limit nastaven jen na 3 ppm. (22)

Nevýhody: Při řezu s neindukčními (netečnými) plyny jako dusík nebo argon, materiál je roztavený výhradně výkonem laseru a odfouknutý ven

z řezné spáry kinetickou energií plynu. Požadovaný příkon laseru je obvykle mnohem vyšší, než při kyslíkovém řezu stejné tloušťky.

#### ***Tlak plynu:***

Při tavném řezání musí být tlak vysoký (až do 2 MPa), narůstající s tloušťkou obrobku. Na druhé straně, nesmí být překročena jistá horní mez, aby nedošlo k zhroucení řezu vlivem plazmy. Při oxidačním řezání, typické tlakové hodnoty jsou v řadě (0,1–0,5) MPa. (22)

Tab.4.1 Doporučené hodnoty tlaků plynu pro řezání CO<sub>2</sub> laserem. (22)

uhlíkové oceli	korozivzdorné oceli	hliník a slitiny	měď a slitiny	titan a slitiny
kyslík (0,05-0,5) MPa	dusík (1-2,5) MPa	dusík (1-2,5) MPa	dusík (1-2,5) MPa	argon (0,8-2) MPa

## **4.4 Parametry obrobku**

Ve světě i s pobočkou v České republice se nejvíce touto tematikou zabývá finská firma Rautaruukki a německá firma Voestalpine, které v současné době dodávají různé druhy polotovarů speciálně navržených pro tepelné dělení.

### ***4.4.1 Typy a vhodnost materiálů***

Pro řezání laserem se nejčastěji jako polotovar používá tabule plechu, případně svitky, ale dnes v moderních CNC řízených laserových zařízeních lze řezat tvary například do karoserií automobilů. (16)

#### **Oceli:**

Měkké oceli a nerezové oceli produkují kvalitní řezné výsledky, protože ocel a slitiny jako chrom a nikl dobře absorbují laserovou energii. Tím je dána vysoká účinnost procesu. Řezané vrstvy se pohybují v rozmezí (0,5-30) mm. (12)

#### **Nerezové oceli a vysokolegované oceli:**

Lze použít kyslíku i dusíku jako řezných plynů. Vysoké řezné rychlosti jsou dosažitelné při použití kyslíku, kvůli exotermickému energetickému příspěvku a také protože mají méně nečistot než uhlíkové oceli. Optimální ohnisková pozice je situovaná těsně pod povrchem. Nevýhodami kyslíkového řezu je přítomnost otřepů a obrobené plochy jsou odlišně zbarvené kvůli chromu a oxidům železa. Chrom jakožto běžný představitel legovaných ocelí redukuje reaktivitu k tomu, aby kyslík tvořil silný oxidický povlak. Tenká vrstva roztavené oceli má nižší chromový obsah než základní materiál. Důvod pro toto vyčerpání chromu během procesu je, že v

řezném procesu železo, nikl, a chrom v roztaveném kovu soupeří v reakci s proudem kyslíku. Chrom je nejreaktivnější ze tří elementů a tak se nejdříve oxiduje. Toto zanechá roztavený kov chudý na chrom. Protože chrom je přidán k nerezovým ocelím k tomu, aby chránil od oxidování, vyčerpání obsahu chrómu znamená, že může být vystavený korozi. Práce pro společnosti je obvykle uskutečněna použitím dusíku. (12,23)

### **Neželezné kovy a jejich slitiny**

#### **Hliník a hliníkové slitiny:**

Čistý hliník je měkký, a často legovaný malým množstvím hořčíku, mědi, manganu, křemíku nebo zinku k tomu, aby zlepšili jeho mechanické vlastnosti. Řez hliníku s CO<sub>2</sub> lasery je považován za obtížný kvůli jeho vysoké odrazivosti a tepelné vodivosti, tím je využito pouze malé procento energie a zbytek velkou měrou odražen. Hliník má také extrémně vysoký bod tání, okolo 2072 °C. Pevné nebo viskózní hliníkové oxidy tvoří slupku na řezné hraně, která zabraňuje kyslíku pronikání do kovu. Slupka oxidů často pukne v důsledku turbulentního toku taveniny a oxidační reakce může ještě postupovat, ačkoli nižší rychlostí. (12,23)

#### **Titan:**

Zde kyslík ani dusík není vhodný, protože jsou absorbované povrchem, kde se pak vytvoří tvrdá a křehká vrstva. Tato vrstva může prasknout, a šíření trhliny může způsobit poruchu součástky. Používá se tedy vysokotlaký řez s neutrálním plynem. Navíc, obrobek je často během řezného procesu upevněn v ochranném prostředí. Většinou je užito vysoce čistý argon (99.996 %) a směs argon-helium s velmi nízkým obsahem kyslíku. (12)

#### **Slitiny niklu:**

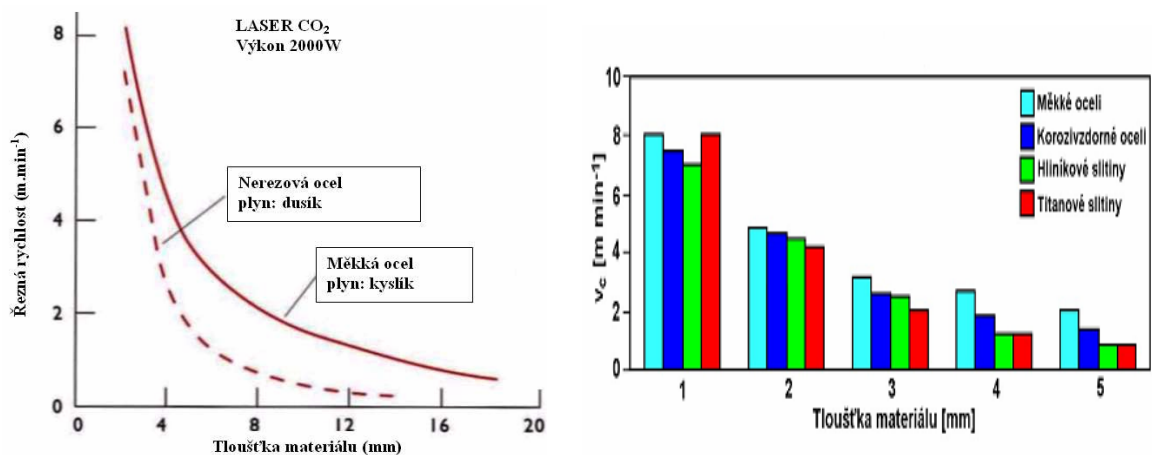
Nikl je v několika továrenských důležitých slitinách: Inconel (Ni-Cr), Nimonic (Ni-Cr-Co), Hastelloy (Ni-Mo-Cr) a Monel (Ni-Cu). Nízkotlaký kyslíkový řez je užíván pro dosažení vysokých řezných rychlostí, ale oříznuté okraje mají okraje a obrobené plochy jsou oxidické. Kvalitní řezy mohou být dosaženy s vysokotlakým dusíkem, řezná rychlost je zde ale významně nižší. Ohnisko by mělo být zanořeno hluboko uvnitř materiálu. (12)

#### **Ostatní materiály:**

Pro tyto materiály je většinou dominantní sublimační řezný proces. V tomto případě je materiál vypařován a pára je vyhozena z řezné zóny vzduchovou tryskou. Touto způsobu vyhovují materiály, jejichž bod vypařování je blízko jejich bodu tání (pryskyřičné - plexisklo). Materiály, které

netají, jsou řezané hořící reakcí tzv. *chemickou degradací* (termosety, polymery, pryskyřice, dřevo). (23)

Lasery lze řezat také lepenku, dřevo, kůži, keramiku a sklo. Lasery s pracovní látkou v pevné fázi mohou řezat křemík pro polovodiče. Řez těchto materiálů však produkuje plyny a nebezpečné látky, které jsou odlišné od těch vyprodukovaných při řezu tabulového plechu. (1)



Obr. 4.7 Parametry řezné rychlosti dle tloušťky materiálu (21)

#### 4.4.2 Materiálové charakteristiky

Reakcí elektromagnetického vlnění na povrchu pevného tělesa způsobí vznik elektrického proudu. Tím, že je omezená elektrická vodivost tělesa, začne narůstat teplota povrchu. Kladné ionty, které tvoří krystalickou mřížku vodiče, vykonávají kolem uzlových bodů mřížky tepelné kmity. Při průchodu elektronového plynu objemem vodiče dochází ke srážkám jednotlivých elektronů s kmitajícími ionty mřížky. S rostoucí teplotou se amplituda kmitů zvětšuje a srážky jsou častější – odpor vodiče roste. (5)

Vlastnosti materiálu jsou prioritní faktory při určování jejich obrobitelnosti laserem. Hodnotí se:

- Energetické a tepelné vlastnosti
- Tepelná vodivost (heat conductivity)
- Struktura povrchu a chemické složení
- Ostatní: hustota, bod tání, obrobitelnost a specifické teplo

Dopadá-li elektromagnetické vlnění na těleso, rozdělí se energie tohoto vlnění na tři části:

**Odražená část - R (reflexe)**

**Pohlčená část - A (absorpce) část, která bude využita (→ v teplo)**

**Průchozí část - T (transmise) = neuvažuje se (T = 0)**

## Rozdělení energie (1)

$$R + A + T = 1 \Rightarrow R + A = 1 \quad (4.4)$$

Optické vlastnosti materiálů jsou materiálovou charakteristikou, ale jsou závislé od parametrů laserového svazku. Obecně však musíme počítat s tím, že i těleso samo vyzařuje energii, jejíž intenzita je funkcí teploty tělesa. Protože podíl prošlého elektromagnetického vlnění (propustnost) je nevýznamný, uvažují se pouze dva podíly z dopadající energie a to: (1,5)

**A. Poměrná odrazivost R (koeficient odrazu – reflexe)**

Rozptyl obecně probíhá ve všech směrech a obsahuje odraz (reflexi) a lom (refrakci) jako speciální případy. Snahou je, aby byla co nejmenší:

Koeficient reflexe  $\underline{R}$  (1)

$$R = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon - 1}}{\sqrt{\varepsilon + 1}} \right|^2 = 1 - \sqrt{\frac{2 \cdot f}{\pi \cdot \sigma}} \quad (4.5)$$

$\varepsilon$  je dielektrická permeabilita,  $\sigma$  elektrická vodivost materiálu a  $f$  je frekvence. (1)

Tab.4.2 Hodnoty reflexe (23)

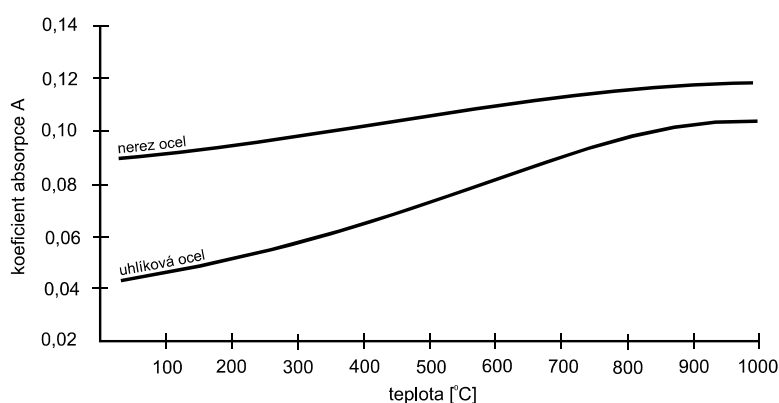
prvek	Odrazivost (%) při 20°C	
	Laser Nd:YAG (1,06μm)	Laser CO <sub>2</sub> (10,6μm)
Al	98,4	99,0
Cu	90,1	98,4
Mo	60,0	96,0
Fe	63,1	92,9
Ti	60,0	92,0

**B. Poměrná pohltivost A (absorpce)**

Z hlediska kvantového popisu roste s teplotou pravděpodobnost absorpce s účinností fotonů. K výraznému (skokovému) růstu dojde v oblasti bodu tání a maxima při vypařování kovu. (1)

Brahmsova rovnice - koeficient absorpce  $A(T)$  (1)

$$A(T) = 0,365 \cdot \sqrt{\frac{R_z(T)}{\lambda}} - 0,0667 \cdot \frac{R_z(T)}{\lambda} + 0,006 \left( \frac{R_z(T)}{\lambda} \right)^2 \quad (4.6)$$



Obr. 4.8 Koeficient absorpce pro uhlíkovou a nerez ocel (24)

$\underline{R_z(T)}$  představuje elektrický odpor materiálu při teplotě  $\underline{T}$ . Protože elektrická vodivost klesá  $\rightarrow$  roste elektrický odpor. Takto se koeficient absorpce zvyšuje až na hodnotu 1 (100%). Čím menší vlnová délka, tím větší ab-

sorpce. Elektrická vodivost (konduktivita)  $G$  je převrácený poměr el. odporu. Závislost el. odporu vodičů na teplotě je ve velkém teplotním intervalu prakticky lineární a můžeme ji vyjádřit vztahem. (4)

Rezistivita  $R_m(T)$  (23)

Konduktivita  $G$  (23)

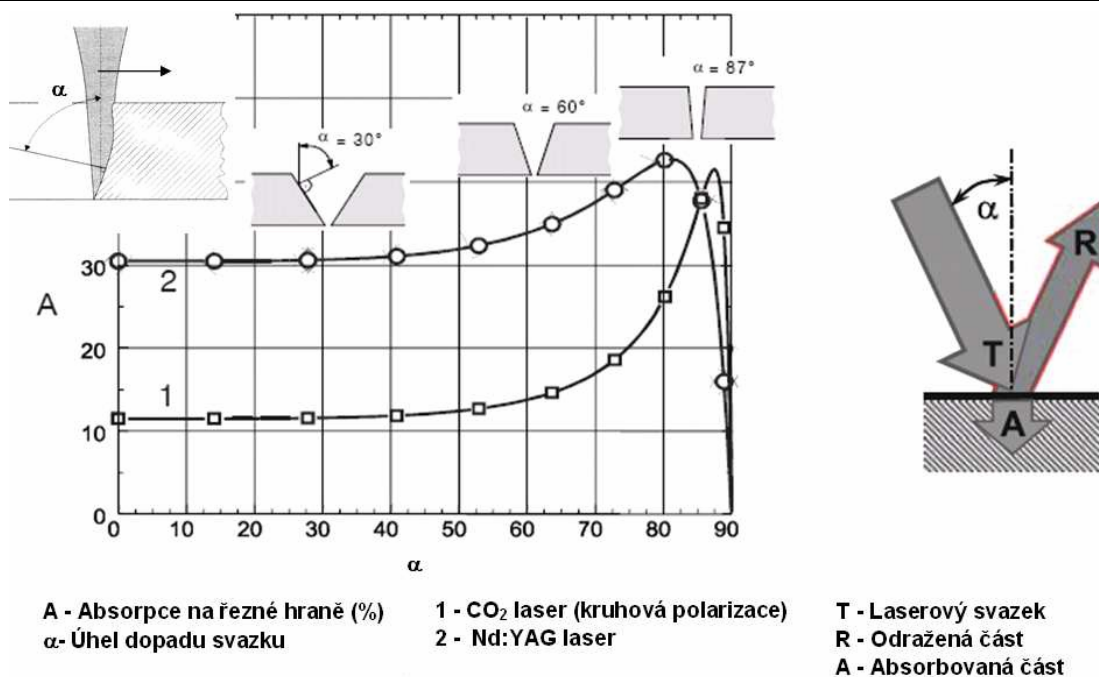
$$R_m(T) = R_0 \cdot (1 + a_T \cdot dt) \quad (4.7)$$

$$G = \frac{U}{I} = \frac{1}{R_v} \quad (4.8)$$

$a_T$  – teplotní součinitel odporu (udává, kolikrát se zvětší odpor při zahřátí vodiče o 1°C);  $dt = (t_1 - t_2)$  - teplotní difference

Tab.4.3 Parametry prvků řezaného materiálu (Laser Raex 250C) (25)

prvek	Zastoupení [%]	Teplota tavení $T_t$ (°C)	Teplota varu $T_v$ (°C)	rezistivita $\Omega_m$ (20°C)	Součinitel vodivosti $\alpha_s$ (K <sup>-1</sup> )
C	0,098	3527	4027	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$-5,00 \cdot 10^{-4}$
Si	0,01	1414	2680	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$-7,00 \cdot 10^{-2}$
Mn	0,88	1220	2150	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$
Al	0,043	660	2450	$2,65 \cdot 10^{-8}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$
Cu	0,03	1083	2595	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$4,31 \cdot 10^{-3}$
Ni	0,04	1455	2920	$6,80 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$
Mo	0,002	2600	4800	$5,20 \cdot 10^{-8}$	$4,70 \cdot 10^{-3}$
Fe	98,753	1536	2750	$9,70 \cdot 10^{-8}$	$6,50 \cdot 10^{-3}$



Obr. 4.9 Koefficient absorpce v závislosti na úhlu dopadu svazku (15)

Jak ukazuje (obr. 4.9) je zapotřebí aby svazek dopadal na povrch pokud možno pod úhlem 90° pro dosažení nejvyšší absorpce. Tento úhel se pak ještě jak je patrné mění v řezné spáře viz. dále. Pro vysoce reflexní materiály hrozí velké riziko poškození zaostřovací čočky nebo optiky laseru. Existuje několik variant jak tomuto předcházet. Lze provést zdrsňení povrchu nebo před vlastním řezem opatřit antireflexními povlaky, které



zvýší absorpci až na cca 80%. Laky však nejsou příliš vhodné z důvodu jejich vypálení před samotnou řeznou zónou. Naproti tomu obyčejné čisticí kapaliny na mastnotu se zde projevují jako vysoce efektivní a na rozdíl od speciálních přípravků cenově výhodné. (1,5)

Tento koeficient je ještě dále závislý na stavu povrchu. Čím je povrch drsnější tím větší absorpce. Překračuje-li struktura povrchu několikanásobně vlnovou délku dojde ke zvýšení absorpce vlivem opakované reflexe v nerovnostech povrchu. (1)

Tab.4.4 Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce oceli (france-35NCD16) (1)

Stav povrchu	Struktura povrchu- Ra (μm)	CO <sub>2</sub> laser(λ=10,6μm); Absorpce (%)
Leštěný	0,02	5,15 – 5,25
Broušený	0,28	7,70 – 7,55
Válcovaný	0,87 – 3,35	5,95 – 12,65

V praxi se dá absorpce zvýšit:

- Zdrsněním povrchu před zpracováním laserem
- Povrchovou úpravou-nátěrem s vyšším koeficientem absorpce
- Mořením
- Předehřevem laserovým paprskem s krátkou vlnovou délkou (1)

### **Karbonizace - uhlíkový ekvivalent:**

Při řezání vlivem teploty dochází ke karbonizaci. Uhlík v TOO způsobuje zvýšení tvrdosti, snižuje plasticitu a potom vzniká vnitřní pnutí. Při použití se tvrdost 350 HV jako maximální tvrdost TOO, což při obsahu uhlíku 0,21% odpovídá 50 % martenzitu ve struktuře. Obvykle jsou pro řezání používány oceli až do 500 MPa pevnosti. Pokud je tvrdost a pevnost vyšší, je třeba používat předehřevu nebo zvýšení řezné rychlosti. Hloubka takto ovlivněné vrstvy je obvykle okolo 0,1 mm a šířka tepelně ovlivněné zóny menší než 5 mm, ale závisí od tloušťky materiálu s kterou narůstá. Maximální tvrdost je pak daná množstvím uhlíku ve vrstvě. Je-li v rozmezí 0,22-0,50%, lze jej stále svařovat a řezat bez předehřevu. Dále se určuje prostřednictvím *uhlíkového ekvivalentu*-  $C_{ekv}$ . Je-li  $C_{ekv}$  je nad 0,25% vzniká zde již možné riziko vzniku martenzitu v TOO a je nutný předehřev.(26)

Uhlíkový ekvivalent (27)

$$C_{ekv} = C + 0,155 \cdot (Cr + Mo) + 0,14 \cdot (Mn + V) + 0,155 \cdot Si + 0,045 \cdot (Ni + Cu) \quad (4.9)$$

$$C_{ekv} = 0,32 \%$$

Teplota předehřevu pro materiály do tloušťky 100 mm (27)

$$T_p = 500 \cdot \sqrt{C_{ekv} - 0,45} \quad (4.10)$$

## 5 METODIKA LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ

Řezný proces je vykonávaný posuvným pohybem fokusovaného laserového paprsku, tím vytváří úzkou řeznou spáru. Pohlcená energie se transformuje v teplo a vzniklá tavenina se odpaří nebo změní na nestabilní formu a lze ji snadno odstranit proudem plynu zasahujícím do řezu. (23)

### 5.1 Druhy řezných procesů

existují 3 základní procesy:

**A) Tavné řezání**

**B) Oxidační řezání**

**C) Vypařovací řezání**

#### **A) Tavné řezání**

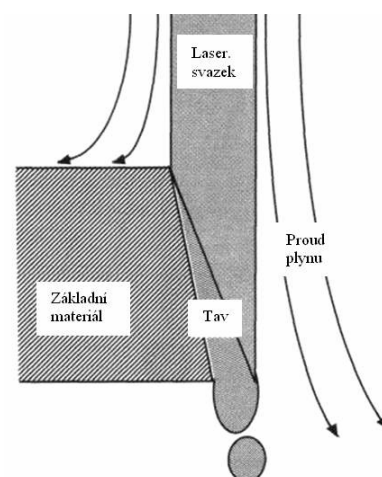
Během tavného řezání laserový svazek jediný zdroj tepla. Zde je celý objem spáry transformovaný v převládajícím tekutém stavu a následně vyfouknut ven z řezu, k čemuž je potřeba vysokých tlaků až 2 MPa netečného plynu. Netečný plyn což je zde většinou dusík nebo argon v rozmezí 10 až 15 barů plní funkci vyfouknutí materiálu z řezu a také stíní ohřátý materiál od okolního ovzduší, výsledkem jsou pak okraje bez oxidů. Hlavní technický požadavek je vyhnout se přilepení roztaveného kovu na spodní části řezu (zabránit vzniku okují).

Používá se pro korozivzdorné oceli, vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny i pro nekovové materiály jako je keramika, plexisklo, dřevo, atd. (23)

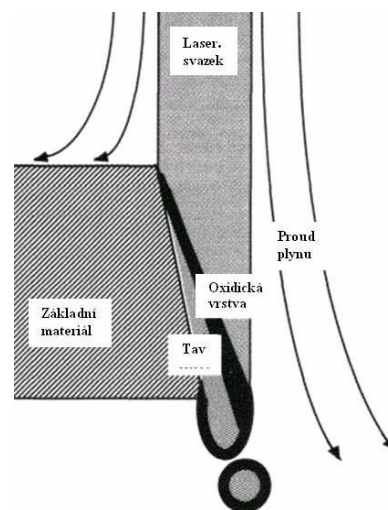
#### **B) Oxidační řezání**

Oxidační řezání se od tavného liší především použitím kyslíku jako pracovního plynu a jeho nižším tlakem cca 3 až 5 barů. Základem řezání je exotermická reakce kyslíku s řezaným materiálem, která probíhá při příslušné zápalné (reakční) teplotě kovu. Vytvoření oxidové vrstvy na přední straně zvyšuje absorpci laserového záření. Zvláště u měkkých ocelí oxidy snižují viskozitu (při teplotách nad 1900K) a povrchové napětí roztaveného kovu a tím zjednodušují vyfouknutí.

Oxidační řezání se využívá pro nelegova-



Obr. 5.1 Tavné řezání (23)



Obr. 5.2 Oxidační řezání (23)

nou až středně legovanou ocel, poněvadž u ostatních kovů kyslík způsobuje výraznou oxidaci řezných hran. U nelegovaných ocelí je řezná plocha hladká s tenkou vrstvou oxidů. (21)

### **C) Vypařovací řezání (sublimační)**

Je realizováno odpařováním materiálu. Používá se pro gumu, polymery, papír, kůži, dřevo atd. Plyn je zde využíván k vyfouknutí plynu z řezu aby nedocházelo ke kondenzaci uvnitř řezu. K vypařování v celém rozsahu může docházet pouze v případě použití krátkých laserových pulsů spolu s vysokou hustotou energie. Jedná se o metodu nejpomalejší, ale je vhodný pro velmi přesné součásti. (21)

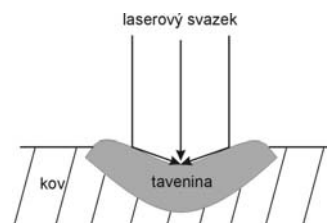
## **5.2 Mechanismus vytvoření řezné spáry**

Dopadající laserový svazek zvyšuje energii elektronů vodivostního pásu, které předávají energii mřížce kovu. Zvýší teplotu povrchu na teplotu varu a tak generuje podobně jako u laserového svařování paroplynový kanál neboli tzv. „Key-hole“ tj. otvor s mírně kuželovým tvarem s průměrem v idealizovaném případě rovno průměru paprsku. (24)

### **5.2.1 Vznik paroplynového kanálu**

Lze konstatovat, že tvorba paroplynového kanálu probíhá ve dvou fázích:

- V první fázi dochází k natavení povrchu, který se vlivem kapilárních sil, konvekce a tlaku par mírně prohne.
- Vlivem samofokusace laserového svazku na takto vzniklé konkávní ploše dojde ke zvýšení hustoty výkonu v ose symetrie svazku. V důsledku toho se začne střed velice rychle prohlubovat a vzniká paroplynový kanál s velkým poměrem průměr/hloubka. (24)

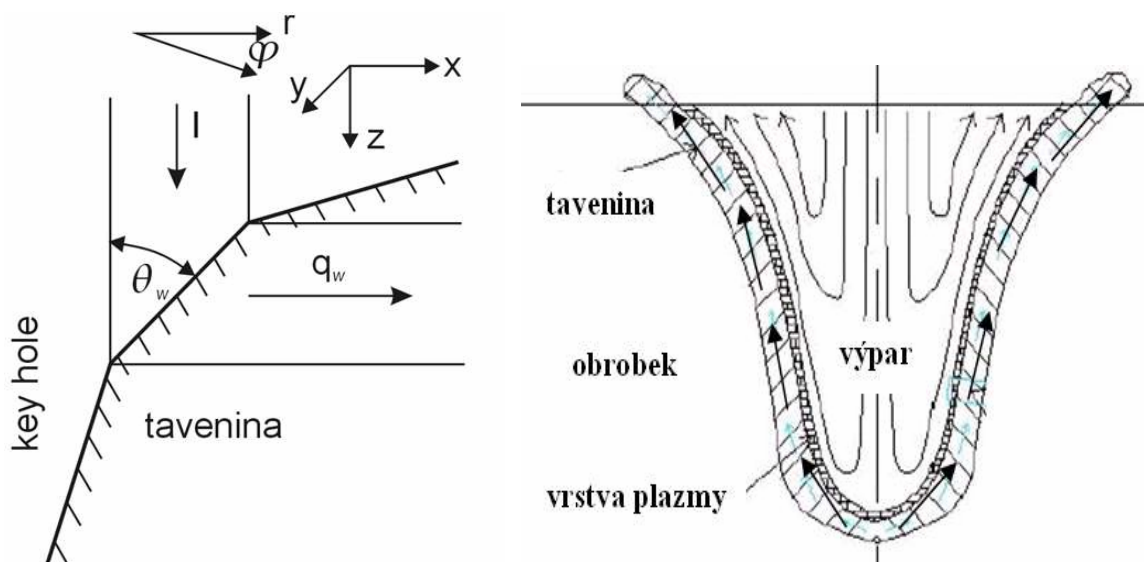


Obr. 5.3 Samofokusace (24)

Paroplynový kanál způsobí náhlé zvýšení absorpce kvůli vícenásobným odrazům a otvor se rychle prohloubí. Je vyplněný parami a plyny roztaveného kovu jakožto produkty tavení, odpařování a reakcí roztaveného kovu s atmosférou prostředí. Tepelná interakce s materiálem při relativním pohybu paprsku se uskutečňuje na čelní stěně paroplynového kanálu odkud se v důsledku dynamické rovnováhy mezi tlakem plynu, par a tekutým kovem, kov přesouvá do jeho zadní části, kde se nahromadí a vytváří taveninovou stěnu. (23,24)

Obecně výsledný tvar key hole závisí na vytvoření lokální tepelné rovnováhy každé plošky stěny mezi přívodem tepla z laserového svazku a tepelným tokem skrze stěnu. Hraniční podmínkou je přitom požadavek aby teplota rozhraní byla na hodnotě teploty vypařování  $T_v$  příslušného kovu. (24)

#### Energetická rovnováha na stěně key hole



Obr. 5.4 Paroplynový kanál (24,21)

Princip výpočtu tvaru key hole založený na principu rovnováhy tepelného toku na stěně key hole. Při tepelné rovnováze musí platit rovnost mezi tepelným tokem do materiálu a absorbovanou intenzitou  $I_a$ . To je intenzita dopadající právě na místo stěny násobená Fresnelovým koeficientem absorpce  $\alpha_{Fr}$ . Je jasné, že úhel sklonu stěny  $\theta_w$  (viz obr. 5.4) se musí „nastavit“ tak, aby byla splněna rovnovážná podmínka:

Sklon stěny (24)

$$\tan \theta_w = \frac{q_v(x)}{I_a(x, z)} = \frac{q_v(x)}{\alpha_{Fr} \cdot (\theta_w) \cdot I(x, z)} \quad (5.1)$$

Kde  $q_v(x)$  je tok tepla do materiálu;  $I(x, z)$  dopadající intenzita v osách  $x, z$

#### Vznik plazmy :

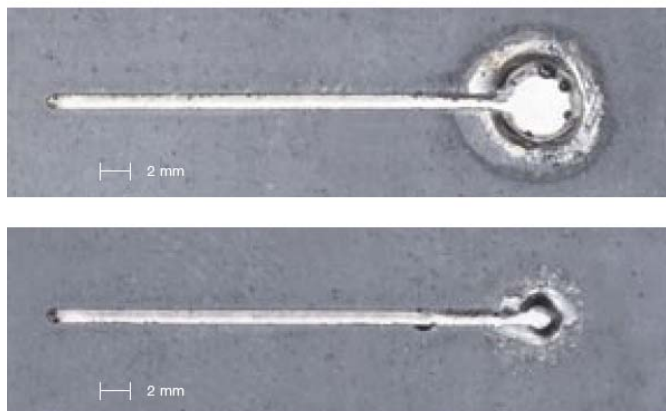
Překročíme-li při ozáření teplotu natavení povrchu, objeví se nad povrchem i vrstva plazmy tvořené excitovanými, popř. ionizovanými atomy odpařeného kovu a volnými elektrony.

Plazma vyvstává když struska, roztavený kov a plyny se nahromadí v řezné spáře. Dlouho byla plazma považovaná výhradně za obtíž, protože zlomy v řezu se obvykle vyskytovaly krátce po objevení mraku plazmy, laserový paprsek již dále neprošel skrz materiál a stroj ohlásil chybu. Později bylo dokázáno, že lze řezat dokonce rychleji s plazmovým mrakem,

protože umožňuje větší tok energie. Závisí však na době vzniku. Nežádoucí je vznik na povrchu, protože blokuje svazek (negativní). Vznikne-li v řezné spáře tak zvyšuje absorpci svazku (pozitivní). (20)

### 5.3 Penetrace svazku do materiálu

Před vykonáním vlastního řezu obvykle musí svazek nejprve proniknout skrze materiál a vytvořit otvor tzv. „startovací bod“. To může být nejproblematictější částí celého procesu řezání v případě, že materiál je vysoce reflexivní nebo vodivý, jako hliník nebo slitiny mědi. V některých případech mohou být výhodné mechanicky předvrtané otvory v obrobku z kterých řezný proces může začít. (16)



Obr. 5.5 Tvary startovacího bodu (16)

Hlavní důvody této problematiky v penetraci jsou:

- Povrch obrobku je pevný, studený, a pod úhlem  $90^\circ$  přicházejícího svazku. To způsobuje mnohem větší reflexi než horká tavenina a naklonění řezné přední strany, která absorbuje paprsek během řezu.
- Teplo obsažené v tavenině je odváděné ze vznikající dutiny pouze směrem nahoru, protože v materiálu doposud není otvor, což vyžaduje mnohem větší tlak plynu. V případě, že není dostatečně roztavený kov vyfukován dojde k zhrubnutí povrchu vlivem rozvodu tepla, ale i naopak příliš velký tlak může způsobit znečištění nebo poškození trysky a čochy rychle letící taveninou. Takové znečištění může vážně ovlivnit řezný výkon stroje.

**Pulzní režim penetrace:** Množství roztaveného kovu vygenerovaného během penetrace může být minimalizovaný využitím svazku v jeho pulzním režimu. Frekvence pulzů (50-100) Hz. Velkou nevýhodou je snížení rychlosti penetrace asi na 1/10, což při řezání velkého počtu obrobků z tabule plechu činí značné prodražení.

**Kontinuální režim penetrace:** Na silném materiálu tento režim měl za následek velké krátery, proto bylo nutné provádět penetraci ve větší vzdálenosti od kontury obrobku a tento materiál se stal odpadem což také značně prodražuje výrobu. (16,23)

## 6 VÝPOČET CHARAKTERISTICKÝCH PROPORCÍ ŘEZU

Pro uskutečnění laserového řezu je třeba nastavit parametry kontrolované člověkem do takového poměru s parametry materiálovými, aby výsledkem byl řez s požadovanými vlastnostmi.

Ve skutečnosti je laserové řezání poměrně nestabilní proces kvůli fluktuacím laserového záření, nestabilitě plazmy a dynamickým jevům roztaveného kovu. Proto je třeba parametry volit tak, aby napomáhaly ke stabilizaci řezného procesu. K tomu je ovšem nutné více vníkat do jednotlivých jevů a dějů probíhajících při laserovém řezání. Velká komplexnost všech jevů však znemožňuje rigorózní simulaci laserového řezání. Proto musíme do materiálových a tepelných toků zavést zjednodušení, bez kterých by výpočty nešlo provést. (24)

### Výskyt „Širokého řezu“

Tento efekt se objevuje při změně řezných podmínek skokově a způsobuje deformaci povrchu v místě řezu. Nelze tedy kvalitativně předvídat. Je známo, že se vzrůstajícím množstvím energie, která je zde zastoupena vneseným teplem  $Q$  dochází ke zhrubnutí řezu. Cílem je zjistit, které z parametrů řezného procesu mají největší vliv na množství vneseného tepla do řezu. V druhé části pak hodnoty těchto parametrů, které jsou považovány za již nepříjemné pro daný způsob řezání a materiál. Tyto budou k dispozici pro obsluhu stroje popř. programátora na tzv. černé listině parametrů při kterých se tento jev vyskytuje.



Obr. 6.1 Ukázka širokého řezu

V praxi přináší široký řez řadu problémů při řezání silných materiálů. Prvotním je zabezpečení obrobku v tabuli plechu. Následuje vytlučení obrobku (je-li vůbec možné), kdy dochází k poškození povrchu. Jak již bylo řečeno, řezání laserem je často finální operací. Proto další komplikací je špatná kvalita povrchu a nedodržení předepsaných tolerancí. Toto se dá opominout pouze v případě následného svařování v ostatních případech je další operací broušení, nebo označení součástky za zmetkovou a vyřazení, což znatelně prodražuje výrobu. Je nutno dodat, že (20-30) mm patří v současnosti mezi horní hranici pro středně výkonné CO<sub>2</sub> lasery. (24)



## 6.1 Vstupní parametry

V této části jsou uvedeny materiálové a strojní parametry, ze kterých se vycházelo pro následující řešení vneseného tepla a dalších veličin.

### 6.1.1 Laserové řezací zařízení

Celá problematika, včetně výroby vzorků, zkoušek a parametrů byla zkoumána na CO<sub>2</sub> laserovém řezacím zařízení od společnosti AMADA umístěném ve firmě DENDERA a.s., se sídlem Kanice 104.

Použitý Laser: AMADA FO3015NT

Výrobní číslo: FO3015.143, rok výroby 2006

Parametry stroje:

- Typ laseru: CO<sub>2</sub>, vlnová délka 10,6  $\mu$ m, maximální kontinuální výkon 4000 W  $\pm$  2%
- Rozměry stolu (= maximální řezné rozměry) 3000 x 1500 mm, Přesnost řezání je 0,1mm / 1m
- Poměr plynů CO<sub>2</sub> : He : N<sub>2</sub> ; maximální tlak 10,3 barů  
(5%  $\pm$  0,25% : 40%  $\pm$  2% : 55%  $\pm$  2,75%)
- Řídicí systém FANUC 160i, 5 řízených os (osy X,Y,Z adaptivní optika)
- Ohnisková vzdálenost použité ZnSe čočky: 7,5" (=190 mm)  
Čistota řezného kyslíku: 3.5 (je použit z kapalně fáze) (28)



Obr. 6.2 Řezací zařízení AMADA FO3015NT (24,28)

### 6.1.2 Experimentální materiál

Pro analýzu byly vzorky vyřezány z materiálů, které se běžně používají k řezání laserem. Navíc byl testován i speciální japonský materiál který se na našem trhu nevyskytuje.

Materiál s oficiálním označením Laser-Raex 250C a Raex 355 MC (C – značí že ocel byla zpracována válcováním za tepla) pochází od finské firmy Rautaruukki comporation. Výroba v Raahe dodává konstrukční oceli podle normy EN 10 025, které překračují požadavky normy EN 10 149. Chemické složení je optimalizováno tak, aby byly získány čistě ořezané díly bez otřepů. Rovinnost plechů je vždy menší než  $3 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ . Oceli jsou vhodné pro všechny běžné svařovací a řezací postupy. Plechy z těchto ocelí se vyrábějí na kvarto a pásových válcovacích tratích. (27)

„Dead Flat” - doválcování tabulových plechů za studena zajišťuje minimalizaci kroucení při jejich svařování a zlepšuje možnost opakovatelného tváření. Při řezání si obrobky zachovávají rovinnost a mezi jednotlivými fázemi zpracování není nutné provádět další rovnání. (27)

Materiál s oficiálním označením Alform 355M (S235J2C) pochází od firmy Voestalpine Stahl GmbH sídlící v Linzu v Rakousku asi 150 km od Vídně spadající pod světovou korporaci Voestalpine. (29)

V případě japonského materiálu se nepodařilo zjistit označení ani výrobce. Tento materiál byl dovezen jakožto testovací k zakoupenému stroji. Do problematiky byl zařazen pro jeho speciální vlastnosti a porovnání.



Obr. 6.3 Ukázka válcování tratě v městě Linz (29)

\* Pro Raex 250C jsou hodnoty přímo z dodacího listu viz. příloha u ostatních jsou hodnoty předepsané pro tabule plechu tloušťky 20 mm.



Tab. 6.1 Materiál Raex 250C - tloušťka materiálu je 20 mm (24)

vzorek číslo	Rychlost $v_c$ [mm/min]	Výkon P [W]	Frekvence f [Hz]	Duty [%]	řezný tlak [MPa]	poloha ohniska [mm]	Poznámka
1	600	3500	600	85	0,01	+2	Otřepy pouze v rozích snadno odstranitelné, bez širokého řezu
2	550	3500	600	85	0,01	+2	Hrubý řez, spodní část zalita struskou
3	500	3500	600	85	0,01	+2	Hrubý široký řez, spodní část řezu zalita kovem, obtížné na vyražení
4	600	3500	600	85	0,02	+2	Zvýšená hrubost, řez v dolní části čistý
5	600	3500	600	85	0,03	+2	Kvalitní řez, bez otřepů, občasné zhrubnutí, spodní část čistá
6	600	3500	600	85	0,01	+1	Občasné zhrubnutí, jinak řez kvalitní, ve spodní části struska
7	600	3500	600	85	0,01	0	Hrubší řez, ve spodní části kov a struska
8	600	3500	600	85	0,01	-1	Hrubší řez, ve spodní části velké množství kovu a strusky, velká síla při vyražení
9	600	3500	600	85	0,01	+3	Kvalitní řez téměř bez strusky
10	600	3500	600	85	0,01	+4	Hrubý řez, struska a kov ve spodní části řezu
11	700	3500	600	85	0,01	+2	Kvalitní řez, malé množství strusky v rozích
12	700	3500	600	85	0,02	+2	Kvalitní řez, zhrubnutí za rohem, zde otřepy
13	700	3500	600	85	0,03	+1	Již hrubší řez, větší zhrubnutí za rohem, zde otřepy, kov ve spáře
14	700	3500	600	85	0,03	+3	Již hrubší řez, větší zhrubnutí za rohem, struska, kov ve spáře

Tab. 6.2 Japonský materiál - tloušťka materiálu 7,5" (18,8 mm) (24)

vzorek číslo	Rychlost $v_c$ [mm/min]	Výkon P [W]	Frekvence f [Hz]	Duty [%]	řezný tlak [MPa]	poloha ohniska [mm]	Poznámka
1J	600	3500	600	85	0,01	+1	Mírný otřep, rovnoměrný řez, lehký závar
2J	700	3500	600	85	0,01	+1	Lehký závar jinak rovnoměrný kvalitní řez
3J	800	3500	600	85	0,01	+1	Kvalitní jemný povrch bez otřepů, bez okují
4J	900	3500	600	85	0,01	+1	Rovnoměrný řez, dobré hrany, velký otřep na spodní straně -vyrazit
5J	900	3500	600	85	0,02	+1	Lehké otřepy, kvalitní hladký řez
6J	900	3500	600	85	0,02	+2	Lehký závar na spodní straně, kvalitní řez

Tab. 6.3 Chemické a mechanické vlastnosti vzorků (25,27,29)

NORMA EN 10025:2-2003	S235JRG1	-	-	-
Materiál	11 373.3	Raex 250C	Raex 355 MC	Alform 355 M
Firma	-	Rautaruukki	Rautaruukki	Voestalpine
R <sub>eh</sub> - horní mez kluzu [MPa]	235	277	355	355
R <sub>m</sub> - mez pevnosti [MPa]	415	397	430-530	430-530
A - tažnost (minimální) [%]	25	31	24	25
zaručené chemické složení [%]				
max. uhlík	0,200	0,120	0,120	0,100
max. křemík	0,280	0,030	0,030	0,030
max. mangan	0,900	1,200	1,500	1,200
max. fosfor	0,045	0,020	0,020	0,018
max. síra	0,050	0,020	0,015	0,010
max.hliník	-	0,015	0,015	0,020

Již z chemického složení je patrný rozdíl mezi klasickou ocelí třídy 11 a ocelí určených pro tepelné dělení, svařování. Jedná se především o obsah křemíku. Křemík ve struktuře zvyšuje tekutost taveniny - váže kyslík a tím hrubne řez. (24)



0,017 % Křemíku ve struktuře



0,18% Křemíku ve struktuře

Obr. 6.4 Vliv obsahu křemíku na řez uhlíkových ocelí (23)

## 6.2 Výpočet parametrů laserového svazku

**a) Poloměr svazku-  $w_0$  v ohnisku  $f$**  - je definovaný jako poloměr, na kterém intenzita poklesne na hodnotu  $(I_0/e^2)$ . V případě malého průměru čočky  $D_\zeta$  je poloměr, který se nachází v ohnisku zanedbatelně malý a lze jej považovat za jediný bod s maximální intenzitou toku. V ostatních případech je nutné s tímto poloměrem počítat. (12,15)

Poloměr svazku  $w_0$  v ohnisku  $f$  (12)

$$w_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D_\zeta} \cdot \frac{1}{K} = f \cdot \theta \quad (6.1)$$

BPP-„beam parameter product“→Kvalita paprsku „K-faktor“ (určuje hodnotu odlišnosti od Gaussova svazku, pro Gaussův svazek = 1) Míra přenosu svazku  $M^2$  je jeho převrácená hodnota (na obrazovce stroje). (15)

Pro dané laserové zařízení je:  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$   $f = 190,5 \text{ mm}$   
 $D_{\text{c}} = 24 \text{ mm}$   $K = 0,62$

U CO<sub>2</sub> laser pracující v CW režimu je při výkonu 3500 W kvalita svazku experimentálně stanovena na  $M^2 = 1,6$  a tedy převrácená hodnota  $K = 0,62$

Tab.6.4 Výsledné poloměry  $w_0$  v ohnisku  $f$

CO <sub>2</sub> laser ( $k=0,62$ )	Gaussův paprsek ( $k=1$ )
$w_0 = 0,0877262 \text{ mm}$	$w_{0 \text{ Gauss}} = 0,0548298 \text{ mm}$

### a<sub>1</sub>) Umístění pasu svazku

DOF- „depth of focus“

Pas svazku je jeho část, která mění poloměr svazku pouze nepatrně a proto se považuje za konstantní. Jedná se o nejdůležitější část svazku neboť má největší podíl na řezu. Její matematický popis je prostřednictvím  $z_R$  - Rayleighovy délky. Směřuje od ohniska na obě strany v poměru  $w(\pm z_R) = w_0 \cdot \sqrt{2}$  tzv. *hloubka ohniska svazku* (5,20)

Rayleighova délka  $z_R$  (20)

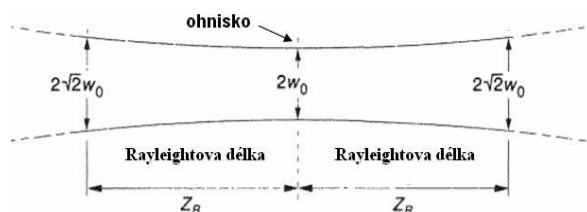
$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (6.2)$$

$$z_R = 2,280 \text{ mm}$$

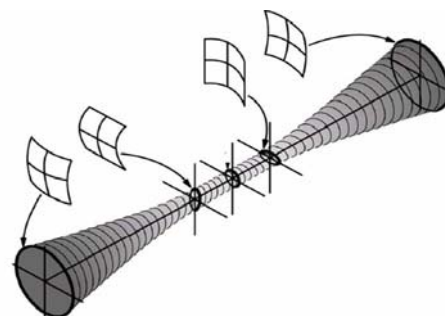
Pas by měl být umístěný buď na povrchu obrobku při používání kyslíku jak řezného plynu nebo až do 75 % tloušťky materiálu obrobku při použití dusíku. Ohnisková pozice je parametr, který musí být řízený, aby zajistil optimální řezný výkon, neboť změna materiálu a tloušťky vyžadují okamžitou zpětnovazební korekci. (5)

### A<sub>2</sub>) Blízké a vzdálené pole divergence

Svazek se nerozbíhá lineárně. Blízko laseru úhel divergence je extrémně malý, s distancí od pasu svazku se úhel divergence asymptoticky blíží limitu. Raleighův rozsah je dělicí mezi blízkým a vzdáleným polem divergence. Okraj svazku je kolmý na vlnoplochy v bodě, pak v tzv. „blízkém poli“ zdroje, kde je směr šíření vlnoploch kolmý ke zdroji je tedy i okraj paprsku v tomto okolí kolmý na směr šíření. (30)



Obr. 6.5 Rayleighova délka (30)

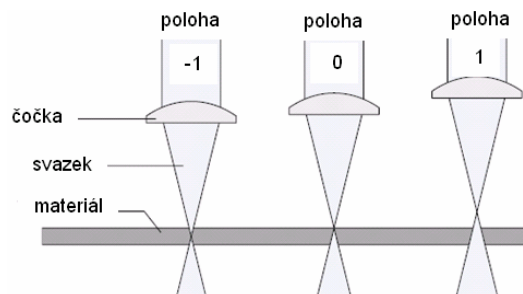


Obr. 6.6 Profil vlnoploch a svazku (30)

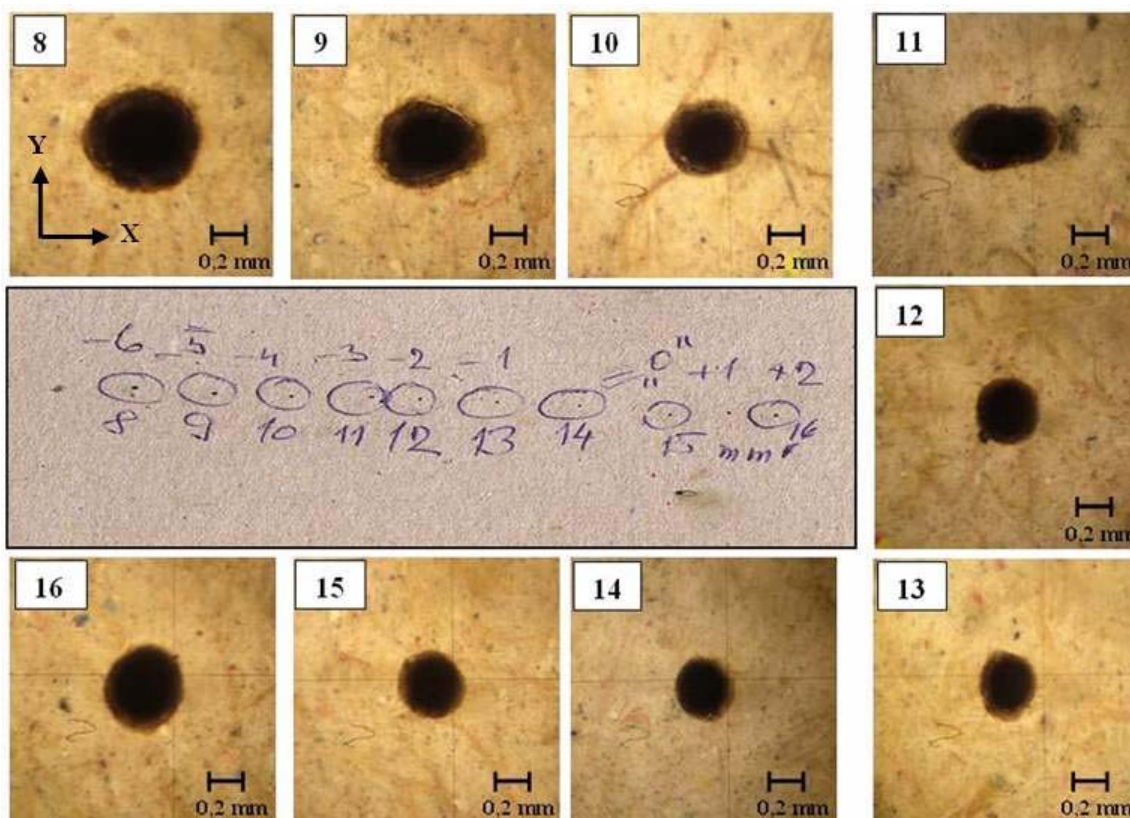
### 6.2.1 Měření polohy ohniska vůči materiálu

Měření bylo provedeno na dílenském mikroskopu vybaveném dvěma mikrometry o rozsahu (0 – 25) mm s přesností 0,01 mm

Podstatou měření bylo zjistit polohu ohniska vůči materiálu. Byly nastavovány postupně polohy ohniska (-6) až (+2) a každá poloha vypálena do podložky (polohy 8–16). Následné odměření v na sebe kolmých osách X a Y, stanovení střední hodnoty.



Obr. 6.7 Určování polohy ohniska (16)



Obr. 6.8 Zjišťování polohy ohniska vzhledem k povrchu materiálu

Tab. 6.5 Odměřená data jednotlivých ohnisek

číslo	x [mm]	y [mm]	střed- $\Sigma$ [mm]	Poloha ohniska	poznámka	Hloubka v materiálu
8	0,475	0,560	0,518	-6		- 12 [mm]
9	0,405	0,520	0,463	-5		-11 [mm]
10	0,350	0,380	0,365	-4		-10 [mm]
11	0,285	0,540	0,413	-3	nepovedený	-9 [mm]
12	0,320	0,345	0,330	-2		-8 [mm]
13	0,310	0,280	0,295	-1	nejmenší	-7 [mm]
14	0,300	0,325	0,313	0		-6 [mm]
15	0,335	0,360	0,348	1		-5 [mm]
16	0,585	0,535	0,560	2		-4 [mm]

Je vidět změna vypáleného průměru dle principu laseru. Nejmenší je pak pozice ohniska (-1), ta by teoreticky měla odpovídat ohnisku na materiálu. Tyto výsledky dávají reálný pohled na pozici optiky a řezného komplexu, avšak v praxi jsou degradovány v důsledku negaussovského rozložení (čemuž odpovídá i měřené průměry), ale také programová korekce stroje pro udržení konstantní vzdálenosti od materiálu.

Z vyhodnocení zkoumaných vzorků (tab. 6.5) a uvažování rovné části rýhování pro posouzení hloubky zanoření ohniska jsou odpovídající hodnoty hloubky ohniska v materiálu odměřené na vzorcích.

### 6.2.2 Výpočet profilu svazku

Jak již bylo řečeno svazek je popsán dvěmi funkcemi na ose „z“ a to:

$R_{(z)}$  popisuje poloměr křivosti vlnoplochy, která protíná osu

$w_{(z)}$  popisuje radius v příčném směru, pro který má amplituda pole zmenšující faktor  $1/e$  s ohledem na hodnotu amplitudy podél osy.

$R_{(z)}$  poloměr křivosti (4)

$$R_{(z)} = z \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot z} \right)^2 \right] = z \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \quad (6.3)$$

$z(\text{mm})$  je vzdálenost od pasu svazku a  $w_0 = 0,0877262 \text{ mm}$  poloměr svazku v ohnisku. Dle Huygenova, se svazek šíří nejen v ose, ale i ve směru kolmém na záření, tím dochází k rozšiřování paprsku v závislosti na vzdálenosti od ohniska a je funkcí vlnové délky  $\lambda$ . (4)

$w_{(z)}$  aktuální poloměr svazku (4)

$$w_{(z)}^2 = w_0^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2 \right] \quad (6.4)$$

Jedná se o hyperbolu s asymptotami tvořícími s osou úhel, který definuje divergenci laserového svazku. Divergence významně ovlivňuje velikost stopy fokusovaného paprsku a tím i hustotu energie v ohnisku. Výsledné hodnoty obou funkcí jsou tabelizovány v tab.6.8. (1,4)

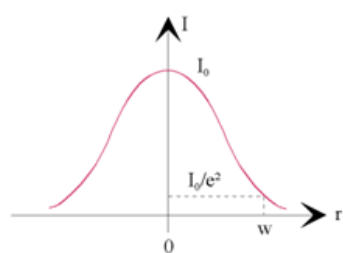
Divergence laserového svazku (4)

$$\theta_{(z)} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad (6.5)$$

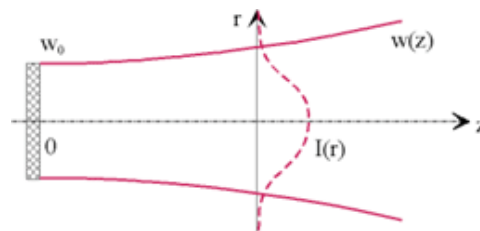
$$\theta_{(z)} = 0,03846 \text{ mrad} = 3^\circ 23' 4,56''$$

### 6.3 Výpočet rozložení intenzity energie laserového svazku

Iradiace představuje celkovou energii dopadající na povrch za jednotku času a na jednotku plochy. Největší intenzita elektrického toku v Gaussově svazku je v jeho ose a s rostoucím poloměrem klesá.



Obr. 6.9a Profil intenzity Gaussova svazku



Obr. 6.9b Okraj svazku a Gaussův svazek (6)

Intenzita v ose svazku (4)

$$I_0 = \frac{P \cdot A_s}{\lambda^2 \cdot z} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot (2 \cdot w_{(z)})^2} \quad (6.6)$$

Výkon  $P=3500$  W;  $A_s$ - plocha ohniska,  $w_{(z)}$ (mm) aktuální poloměr svazku  
Rozdělení energie napříč svazkem. (4)

$$I_R = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2R^2}{w_{(z)}^2}\right) \quad (6.7)$$

$R$ (mm) – vzdálenost od osy svazku

Tab.6.6 Výsledné hodnoty intenzit energie svazku

Intenzita v ose svazku ( $z = 0$ )	Intenzita napříč svazkem ( $R = 0,1$ mm)
$I_0 = 7,2382 \cdot 10^{10} \text{ W.m}^{-2}$	$I_R = 5,383 \cdot 10^9 \text{ W.m}^{-2}$

Ostatní výsledné hodnoty rozložení intenzity jsou tabelizovány v tab.6.8 a uvedeny do grafů.

Dále se určuje efektivní oblast využití svazku z poměru aktivních úseků kde: ( $\theta=0,3846$  mrad ;  $w_0=0,0877262$  mm ;  $P=3500$  W ;  $I_0=7,283 \cdot 10^{10} \text{ W.m}^{-2}$ )

Aktivní úsek  $g_p$  (1)

$$g_p = \frac{4 \cdot w_0}{\theta_{(z)}} \quad (6.8)$$

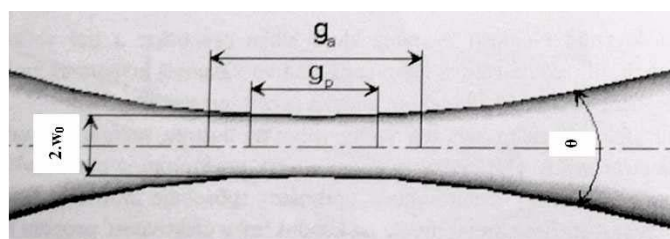
Aktivní úsek  $g_a$  (1)

$$g_a = \frac{4 \cdot w_0}{\theta_{(z)}} \cdot \left( \frac{P}{\pi \cdot w_0^2 \cdot I_0} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.9)$$

Tab.6.7 Výsledné hodnoty aktivních úseků

Aktivní úsek $g_p$	Aktivní úsek $g_a$	Diference $g_p - g_a$
$g_p = 9,1238$ mm	$g_a = 9,1055$ mm	0,0183 mm

Maximální hodnota aktivního úseku  $g_a$  je takřka totožná s parametrem  $g_p$ , tím je pro dosažení minimálního výkonu potřebného pro roztavení materiálu splněná podmínka. (1)

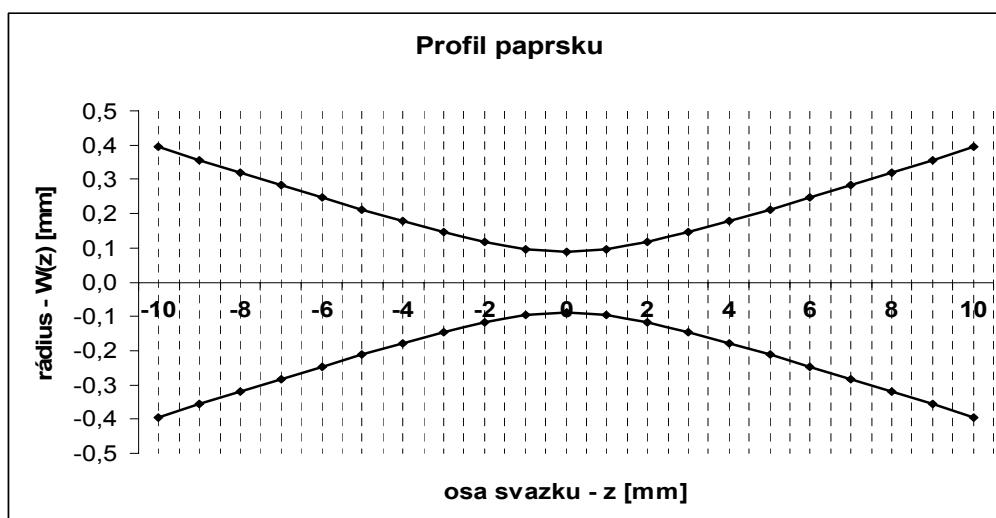


Obr. 6.10 Efektivní oblast svazku (1)

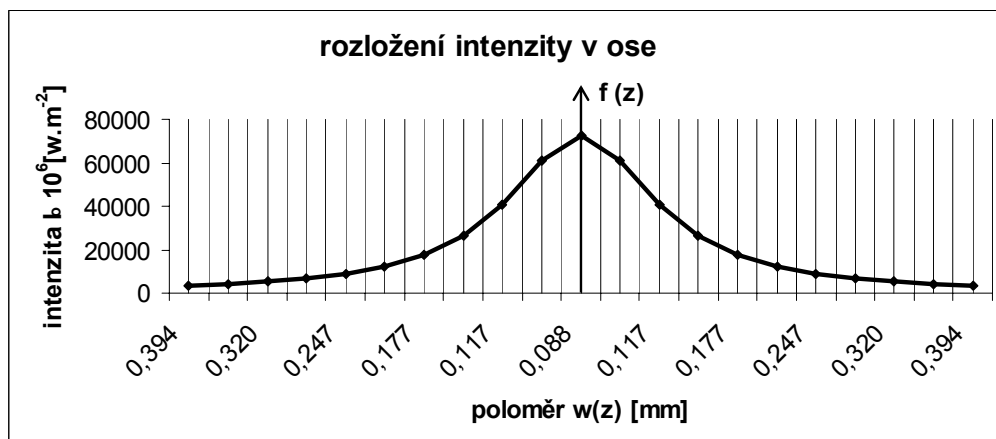


Tab.6.8 Výsledné hodnoty osových a radiálních intenzit dle polohy ohniska ; Výsledné poloměry křivosti R(z)

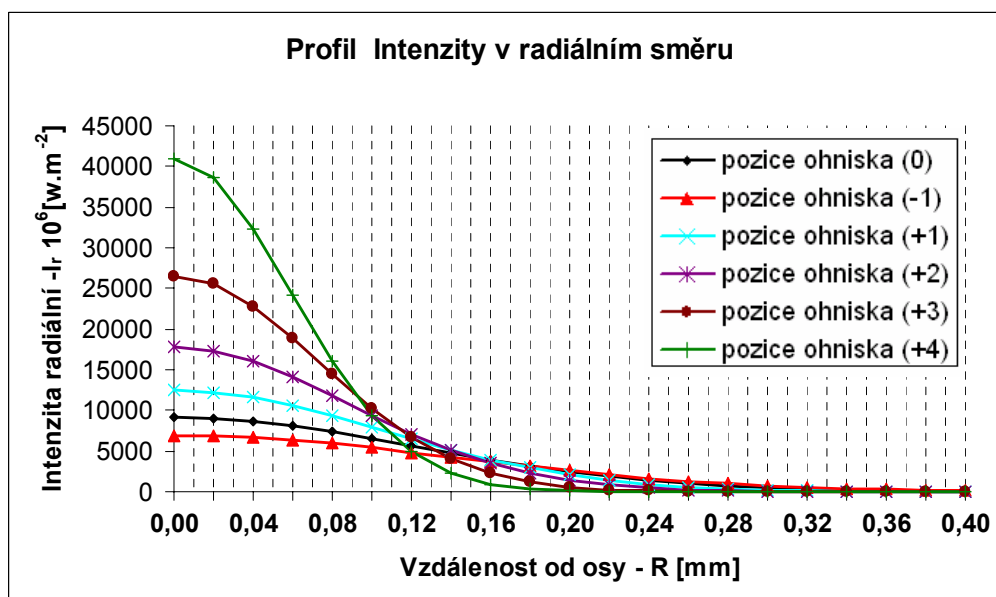
$I_{\text{osový}}$ $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	Z [mm]	R [mm]	W(z) [mm]	R(z) [mm]	$I_{\text{radiální}}$ Ohnisko $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (-1) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (0) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (1) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (2) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (3) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$	$I_{\text{radiální}}$ (4) $10^6 [\text{W.m}^{-2}]$
3579	-10	0,00	0,394	-	3579	3579	3579	3579	3579	3579	3579
4368	-9	0,02	0,357	-	3937	4325	4311	4291	4258	4205	4119
5441	-8	0,04	0,320	-	3590	5229	5163	5065	4914	4673	4302
6947	-7	0,06	0,283	-	2726	6351	6173	5913	5522	4932	4094
9139	-6	0,08	0,247	-	1732	7791	7408	6863	6077	4970	3569
12468	-5	0,10	0,211	-	927	9715	8980	7969	6590	4812	2869
17760	-4	0,12	0,177	-	421	12401	11072	9322	7090	4509	2141
26514	-3	0,14	0,145	-	163	16261	13937	11026	7598	4104	1489
40920	-2	0,16	0,117	-	53	21608	17665	13009	7998	3577	952
60712	-1	0,18	0,096	-	13	27058	20968	14236	7691	2778	520
72382	0	0,20	0,088	-	2	26688	19480	12078	5648	1607	203
60712	1	0,22	0,096	6,2	0	18154	12403	6955	2773	606	50
40920	2	0,24	0,117	4,6	0	9727	6181	3105	1039	170	9
26514	3	0,26	0,145	4,7	0	4911	2885	1286	356	43	1
17760	4	0,28	0,177	5,3	0	2513	1356	531	120	10	0
12468	5	0,30	0,211	6,0	0	1321	650	222	40	2	0
9139	6	0,32	0,247	6,9	0	711	317	93	13	1	0
6947	7	0,34	0,283	7,7	0	389	156	39	4	0	0
5441	8	0,36	0,320	8,7	0	215	77	16	1	0	0
4368	9	0,38	0,357	9,6	0	119	38	7	0	0	0
3579	10	0,40	0,394	10,5	0	66	19	3	0	0	0



Obr. 6.11 Výsledný profil svazku pro Gaussovo rozložení



Obr. 6.12 Rozložení intenzity v ose svazku



Obr. 6.13 Profil intenzity v radiálním směru



**Zhodnocení výsledků:**

První graf zobrazuje reálnou změnu aktuálního poloměru svazku  $w_{(z)}$  podle vzdálenosti od pasu svazku  $Z$  (-10 až 10 mm). Intenzita v ose svazku klesá z druhou mocninou aktuálního poloměru svazku  $w_{(z)}$ . Tento pokles není tak rapidní a ještě ve vzdálenosti  $Z = 10$  mm od pasu paprsku je intenzita  $3,579 \cdot 10^9 \text{ W.m}^{-2}$ . Tato závislost je zobrazená v (obr. 6.12) a je vidět že má gaussův tvar. Závislost intenzity v ose paprsku na vzdálenosti od pasu paprsku by byla lineární.

Dále je spočítána intenzita v radiálním směru (ve směru posuvu) pro všechny možné polohy ohniska (na povrchu materiálu), které byly použity na vzorky včetně ohniska samotného v závislosti na vzdálenosti od osy svazku  $R$  (od 0 až po 0,4 mm). Pro naše vzorky bylo nastavení ohniskové vzdálenosti [-1,0,1,2,3,4]. Pro ohnisko je reálná s ohledem na poloměr ohniska  $w_0 = 0,0877262$  mm pouze část kde  $R$  tuto hodnotu nedosáhne (tedy  $R = w_0$ ) dále je logicky nulový. Pro ostatní se mění hodnoty podle aktuální polohy ohniska vzhledem k povrchu materiálu (tedy jedná se o intenzity v radiálním směru na povrchu materiálu). Čím je ohnisko výše, tím klesá poloměr  $w_{(z)}$  na povrchu a tím i intenzita v radiálním směru. Tento pokles je však již exponenciální vyšších řádu proto je znatelně intenzivnější. Jeho průběh je na obr. 6.13. V tabulce je ještě uvedena změna poloměru křivosti  $R_{(z)}$  se vzdáleností od pasu svazku  $Z$ .

Tímto je vyjádřena intenzita energie svazku v každém jeho bodě.

Je tedy velice důležité pečlivé odzkoušení a nastavení vzdálenosti mezi čočkou a obrobkem, neboť tím ovlivňujeme celou hladinu intenzity která bude do materiálu vstupovat a její pozici. Když budou řezané tlustší materiály, hloubka ohniska musí být přizpůsobená tloušťce výběrem delší ohniskové vzdálenosti.

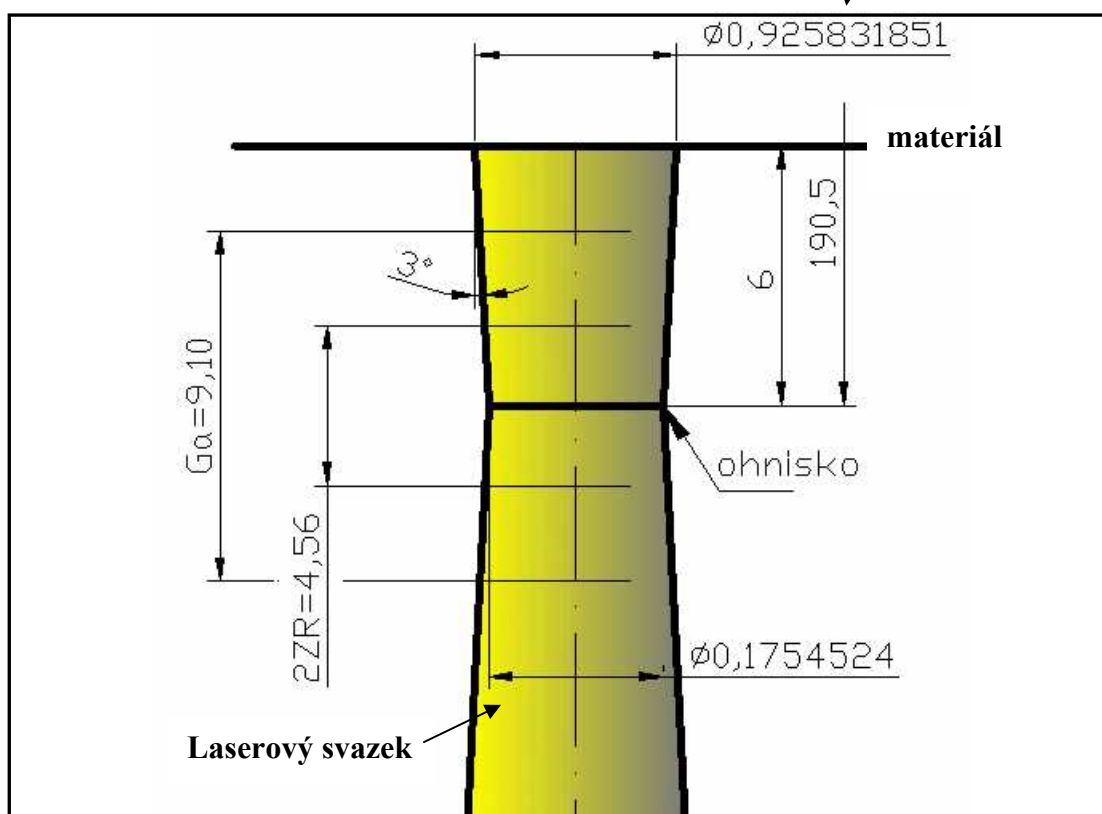
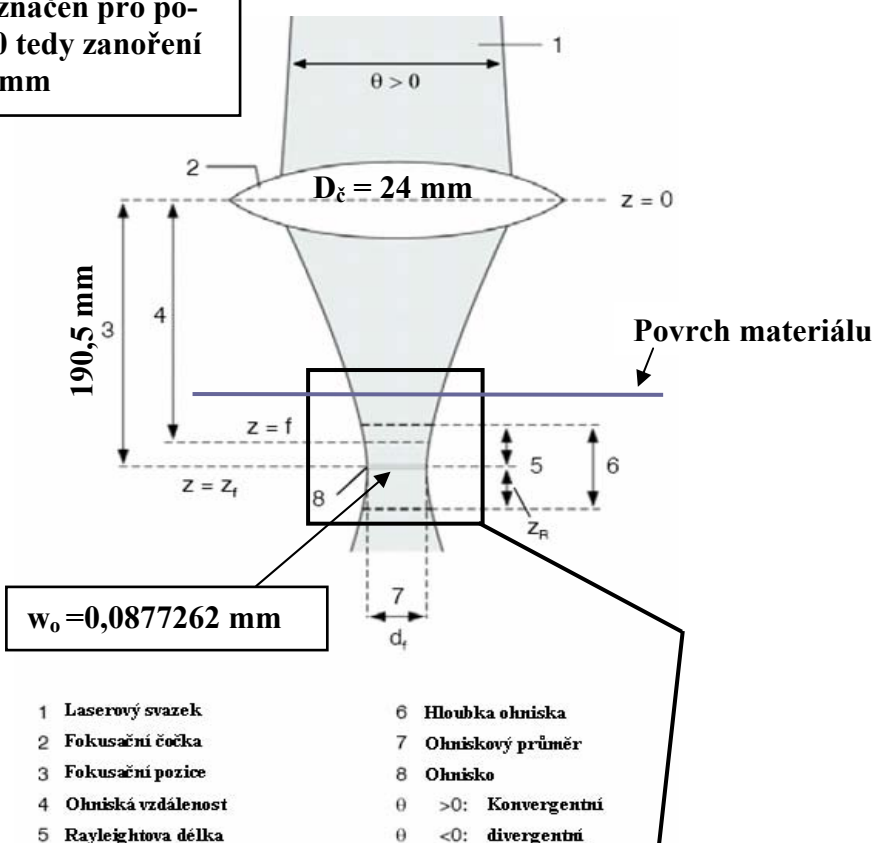
**6.4 Výpočet vneseného tepla do řezu**

Při manipulaci s ohniskovou vzdáleností  $f_m$  dochází k tomu, že pas svazku se zanořuje do materiálu a naopak. Tím dochází k rozšiřování respektive sužování plochy svazku. Následkem je změna vnesené energie.

**Výpočet zanořené plochy svazku:**

Předpokladem je kuželový tvar laserového svazku jakožto aproximace jeho skutečného tvaru. Je tedy nutné spočítat plochu pláště komolého kužele  $S_{pl}$  pro všechny polohy ohniska. Celková plocha svazku interagující s materiálem byla brána od povrchu materiálu po ohnisko a dále do  $\frac{1}{2}$  Rayleighovy délky  $Z_R$ . Vychází se z podobnostního poměru kuželů od průměru čočky  $D_c$ , poloměru ohniska  $w_0$  a ohniskové vzdálenosti  $f=190,5$  mm (obr. 4.13). Ještě je uveden objem této části svazku  $V_{sv}$ . (31)

Výpočet je naznačen pro polohu ohniska 0 tedy zanoření v materiálu 6 mm



Obr. 6.14 Profil paprsku v materiálu (15)

Výpočty plochy a objemu pláště svazku:

$$x = D_{\varepsilon} - 2 \cdot w_0 = 23,8245 \text{ mm} \Rightarrow \frac{x}{2} = 11,9122 \text{ mm}$$

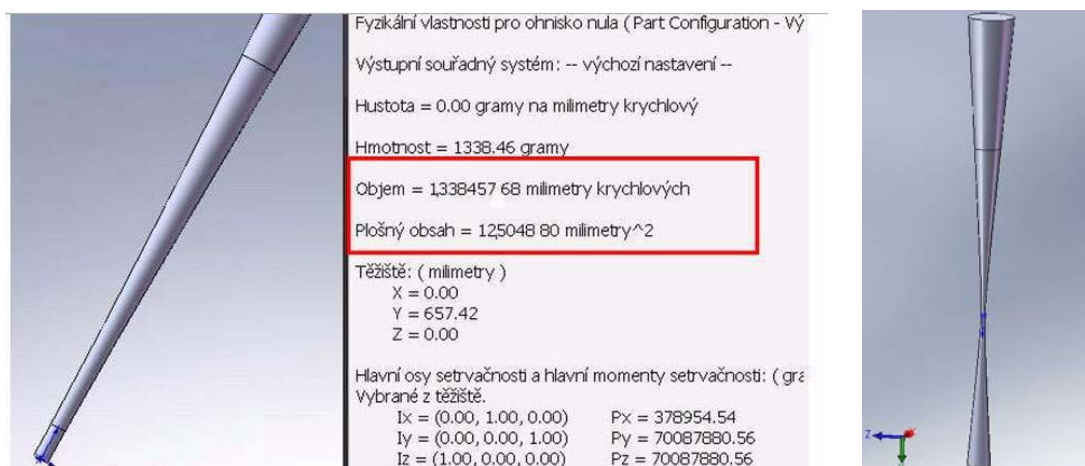
$$\tan \alpha = \frac{x/2}{190,5} = 0,062531 \Rightarrow \alpha = 3^{\circ}34'41,3''$$

$$2 \cdot r_1 = D_{\varepsilon} - 2 \cdot \tan \alpha \cdot (190,5 - 6) = 0,925832 \text{ mm}$$

$$2 \cdot r_2 = D_{\varepsilon} - 2 \cdot \tan \alpha \cdot (190,5 - \frac{4,56}{2}) = 0,460830 \text{ mm}$$

$$S_{pl} = \pi \cdot (r_1 + w_0) \cdot 6 + \pi \cdot (r_2 + w_0) \cdot \frac{4,56}{2} = 12,9048 \text{ mm}^2$$

$$V_{sv} = \frac{\pi \cdot 6}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot w_0 + w_0^2) = 1,6499 \text{ mm}^3$$



Obr. 6.15 Modelace a srovnání v programu Solidworks

Výsledky z modelace a výpočtem se liší na rozlišovací úrovni zanedbatelně. Proto aproximace exponenciálního průběhu kuželovou plochou je pro výpočty zcela dostačující. Při úvaze profilu laserového svazku není celý profil v kontaktu s materiálem. V kontaktu je pouze přední část svazku která materiál taví. Tedy budeme uvažovat pouze  $\frac{1}{2}$ . Úhel  $\alpha$  je srovnatelný s předcházejícím výpočtem úhlu divergence  $\theta$ . Nyní je k dispozici intenzita svazku určená v každém bodě v prostoru a ozářená plocha. Dále je nutné určit dobu interakce laserového svazku s materiálem.

Doba interakce svazku  $\tau$  (5)

$$\tau = \frac{l_R}{v_c} = \frac{2 \cdot w_0}{v_c} \quad (6.10)$$

Tab.6.9 Doba interakce  $\tau$

$v_c = 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
$\tau = 0,0021 \text{ s}$	$\tau = 0,0015 \text{ s}$	$\tau = 0,00116 \text{ s}$

Před vlastním výpočtem množství vneseného tepla  $Q$  přes intenzitu laserového svazku je třeba zavést do vztahu vliv absorpce (absorpční koe-

ficient). Tento je odvislý od úhlu dopadu a jeho hodnota pro  $\theta_{(z)} = 3^\circ$  je  $A = 0,61$ . Tedy pouze 61% z celkové energie je využito a zbytek ve formě odrazu nebo rozptylu odvedeno.  $\tau = 0,0015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $I_0 = 7,283 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . (31)

Vnesené teplo  $Q$  (5)

$$Q = I_0 \cdot \tau \cdot \frac{1}{2} \cdot S_{pl} \cdot A(T) \quad (6.11)$$

$$Q = 48,22 \text{ J}$$

Pomocí měrného tepla se počítá množství tepla  $Q$ , které je potřeba k ohřátí hmoty  $m$  o  $\Delta T$  nebo jejíž měrné teplo v daném rozmezí teplot je  $c_p$ . Tímto způsobem lze spočítat množství materiálu, které bude nataveno. Získaná hmotnost  $m$  se převede na objem spáry  $V_{sp}$  a za předpokladu vypaření objemu čistého válce s výškou tloušťky materiálu spáry  $t_{sp}$  obdržíme poloměr odstraněné části spáry  $w_{ox}$ . Tento poloměr je spíše orientační pro představu sloupce odebraného materiálu. Nepřihlížíme k tomu, že měrná tepelná kapacita  $c_p$  je nelineárně závislá na teplotě. (25,31)

Hmotnost odstraněné části spáry (25)

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \Rightarrow m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad (6.12)$$

$$m = 0,0352 \text{ g}$$

$\Delta T = 2980^\circ\text{C}$  a měrné teplo  $c_p = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Objem odstraněné části spáry

$$m = V_{sp} \cdot \rho \Rightarrow V_{sp} = \frac{m}{\rho} \quad (6.13)$$

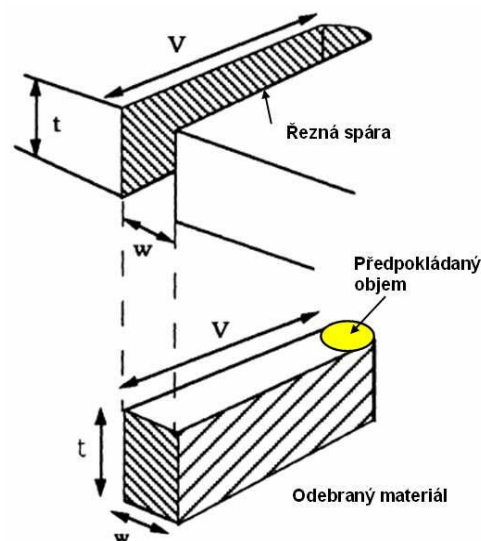
$$V_{sp} = 4,510 \text{ mm}^3$$

Hustota  $\rho = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Poloměr odstraněné části spáry

$$w_{ox} = \sqrt{\frac{V_{sp}}{\pi \cdot t_{sp}}} \quad (6.14)$$

$$w_{ox} = 0,2659 \text{ mm}$$



Obr. 6.16 Odebraný objem (20)

Rychlost penetrace do materiálu (4)

$$v_f = \frac{I_0}{\rho \cdot [L_T + c_p \cdot (T_v - T_o)]} \quad (6.15)$$

$$v_f = 6,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

teplota okolí  $T_o = 20^\circ\text{C}$ ;

měrné teplo  $c_p = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

hustota  $\rho = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

teplota vypařování  $T_v = 3000^\circ\text{C}$ ;

latentní teplo  $L_T = 6500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

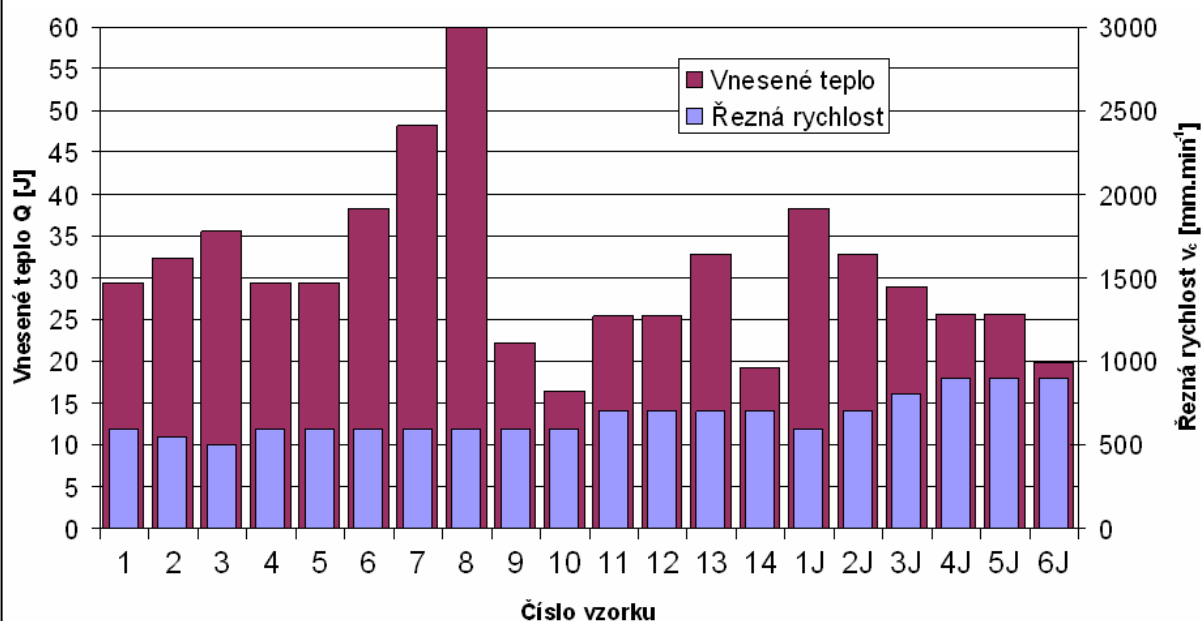
maximální intenzita  $I_0 = 7,283 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Tato hodnota se může zdát velká, ale je nutno přihlídnout k době interakce cca  $\tau = 0,0015 \text{ s}$  čemuž odpovídá hloubka penetrace  $h_f = 10,155 \text{ mm}$ . (4)

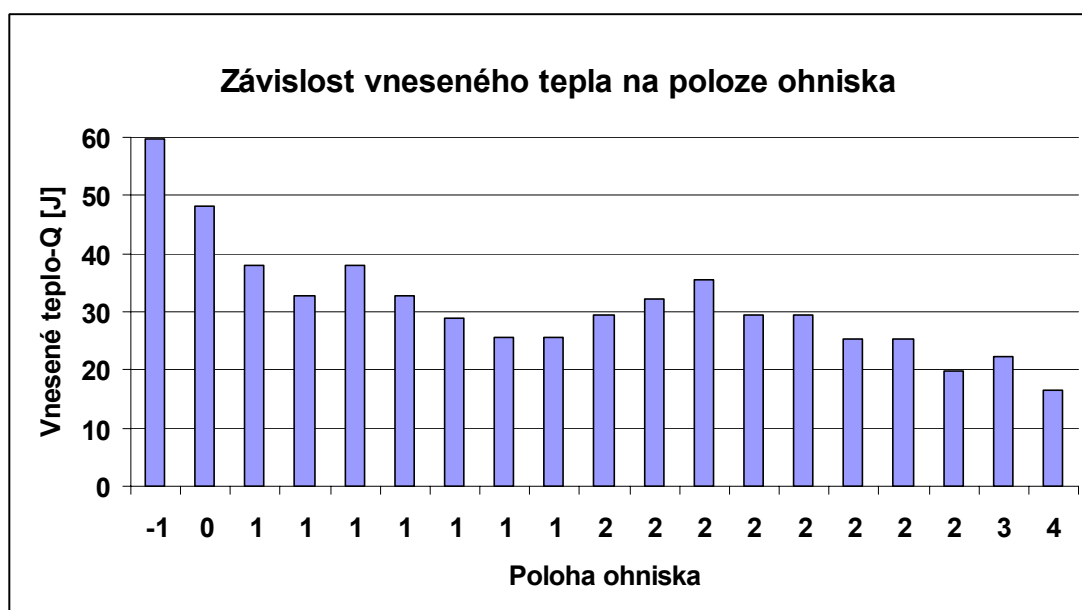
Všechny vzorce pro ostatní polohy jsou zpracovány formou tabulky č.6.10.

Tab.6.10 Výsledné hodnoty vneseného tepla Q a odstraněné hmoty m

vzorek č.	rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	poloha ohniska	Plocha S <sub>pl</sub> [mm]	Objem V <sub>sv</sub> [mm <sup>3</sup> ]	čas [s]	Q [J]	Hmotnost m [g]	Objem V <sub>sd</sub> [mm <sup>3</sup> ]	Poloměr w <sub>ox</sub> [mm]
1	600	2	7,874	0,63	0,00174	29,44	0,0215	2,753	0,2078
2	550	2	7,874	0,63	0,00191	32,31	0,0236	3,022	0,2177
3	500	2	7,874	0,63	0,00210	35,53	0,0259	3,322	0,2283
4	600	2	7,874	0,63	0,00174	29,44	0,0215	2,753	0,2078
5	600	2	7,874	0,63	0,00174	29,44	0,0215	2,753	0,2078
6	600	1	10,193	1,06	0,00174	38,11	0,0278	3,563	0,2364
7	600	0	12,900	1,65	0,00174	48,22	0,0352	4,510	0,2659
8	600	-1	16,012	2,42	0,00174	59,86	0,0437	5,598	0,2963
9	600	3	5,947	0,34	0,00174	22,24	0,0162	2,079	0,1806
10	600	4	4,414	0,15	0,00174	16,50	0,0120	1,543	0,1556
11	700	2	7,874	0,63	0,00150	25,38	0,0185	2,373	0,1929
12	700	2	7,874	0,63	0,00150	25,38	0,0185	2,373	0,1929
13	700	1	10,193	1,06	0,00150	32,85	0,0240	3,0723	0,2195
14	700	3	5,947	0,34	0,00150	19,17	0,0140	1,792	0,1677
1J	600	1	10,193	1,06	0,00174	38,11	0,0278	3,563	0,2364
2J	700	1	10,193	1,06	0,00150	32,85	0,0240	3,0723	0,2195
3J	800	1	10,193	1,06	0,00132	28,82	0,0210	2,695	0,2056
4J	900	1	10,193	1,06	0,00117	25,60	0,0187	2,394	0,1938
5J	900	1	10,193	1,06	0,00117	25,60	0,0187	2,394	0,1938
6J	900	2	7,874	0,63	0,00117	19,78	0,0144	1,849	0,1703



Obr. 6.17 Závislost řezné rychlosti a vneseného tepla pro jednotlivé vzorky



Obr. 6.18 Závislost vneseného tepla na poloze ohniska

**Zhodnocení výsledků:**

Na vnesené teplo  $Q$  do řezu má největší vliv z laserových parametrů právě poloha ohniska spolu s řeznou rychlostí. Jejich vliv lze posoudit porovnáním vzorků. Pro vzorky č.6,8 je stejná řezná rychlost  $600\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a jak ukazuje graf (obr 6.17) vzorek č.8 (poloha ohniska -1) vykazuje skoro 100% nárůst vneseného tepla než vzorek č.6 (poloha ohniska +1). Naproti tomu u vzorků č.3,11 je stejná poloha ohniska (+2) a zvýšení řezné rychlosti (z  $500$  na  $700$ )  $\text{mm}/\text{min}^{-1}$  vykazuje nárůst 28,56%. Původní myšlen-



kou bylo měnit parametry řezné rychlosti do doby, dokud nebude řez kvalitní, ale jak ukazuje graf na obr. č.6.17 změna řezné rychlosti nemá takový vliv jako poloha ohniska. Poloha ohniska totiž ovlivňuje nejen velikost interagující plochy  $S_{pl}$ , ale i umístění maximální intenzity  $I_0$ .

Tyto výpočty jsou však postavené na základě gaussova svazku rozložení energie korigovaného pouze faktorem kvality K. Je proto namístě otázka do jaké míry je tento předpoklad seriózní a zdali nezkresluje realitu. K poodhalení je dále provedený náznak vlivu při převodu na skutečný mod kterým byl materiál řezán.

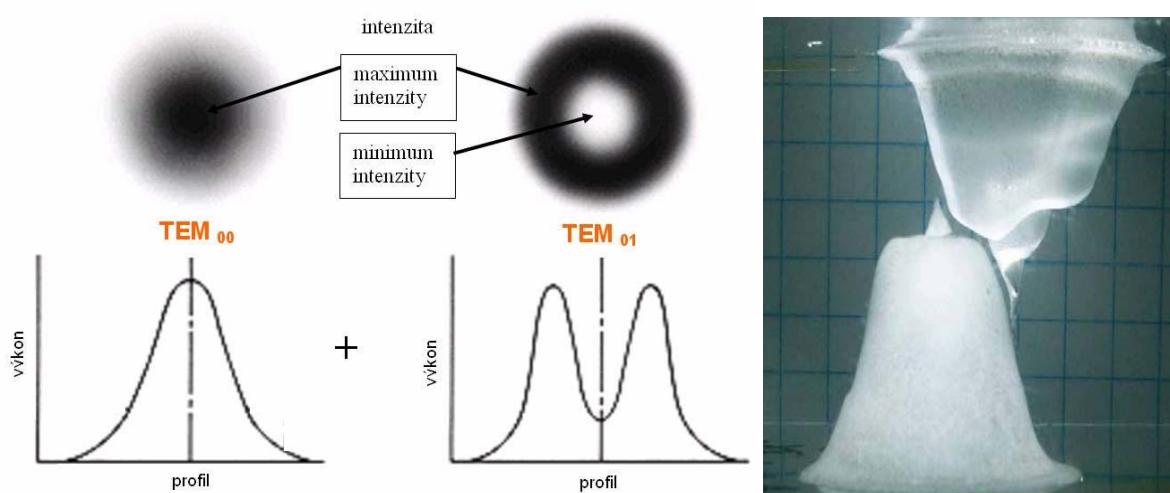
## 6.5 Diagnostika reálného laserového svazku

Vzhledem k ceně laserové optiky a práci samotné je důležitá znalost profilu svazku. Existují dnes firmy např. Spiricon nebo Prometec dodávající přesné profesionální přístroje pro diagnostiku pracující na principu rotující duté jehly s kalibrovaným otvorem pro vstup svazku. Tyto přístroje jsou však pro svoji přesnost a složitost velice nákladné a pro zevrubný propočet bez přesných dat i zbytečné. Globální charakteristiky jako tvar a mód lze provést výpalem do plexiskla nebo azbestu. (1)

Pro danou problematiku byl profil svazku vypálen do plexiskla.

Jedná se o směsný mód složený ze dvou základních módů a to:

$$TEM_{\text{směsný}} = 3 \cdot TEM_{00} + TEM_{01} \quad (24)$$



Obr. 6.19a Rozložení elektromagnetického pole (32)

Obr. 6.19b Zkoumaný laserový svazek vypálený do plexiskla (24)

### **Matematický popis vzniku směsného modu pro aktuální případ**

Obecně je rozložení pole v rovině  $x - z$  kolmé k ose šíření popsáno funkcemi, nazývanými Hermitovy polynomy. Předpokládáme rotační symetrii.

Hermitův polynom Gaussova rozložení (13)

$$f_0\left(\frac{z}{w(z)}\right) = H_0\left(\frac{z}{w(z)}\sqrt{2}\right)\exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] = \exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] \quad (6.16)$$

Mód s minimem uprostřed tedy TEM01 je popsán následující funkcí:

Hermitův polynom pro TEM01 rozložení (13)

$$f_2\left(\frac{z}{w(z)}\right) = H_2\left(\frac{z}{w(z)}\sqrt{2}\right)\exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] = 2\left[4\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2 - 1\right]\exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] \quad (6.17)$$

Směsný mód obsahuje součet obou těchto funkcí, tedy:

Vztah pro směr modů (13)

$$f_{smes} = A \cdot f_0 + B \cdot f_2 \quad (6.18)$$

Kde  $A, B$  jsou koeficienty určující míru zastoupení jednotlivých složek ve výsledném módu.  $TEM_{směsný} = 3 \cdot TEM00 + TEM01$

Hermitův polynom pro směr modů (24)

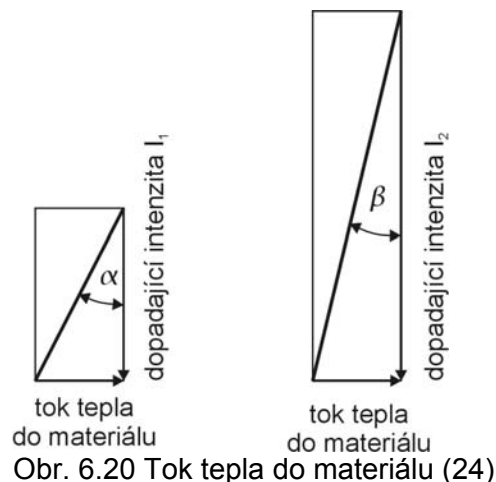
$$f_{smes} = 3 \cdot \exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] + 1 \cdot 2\left[4\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2 - 1\right]\exp\left[-\left(\frac{z}{w(z)}\right)^2\right] \quad (6.19)$$

Princip metody je založen na myšlence, že rozdílné absorbované intenzity musí vytvořit stejný tepelný tok do materiálu, odpovídající určité povrchové teplotě. Tohoto stavu lze dosáhnout pouze změnou velikosti absorbované plochy. Jinými slovy vyšší intenzita se musí absorbovat větší plochou tím, že absorbojící plocha bude více skloněná (viz obr 6.20). Obrázek není zcela názorný. (24,33)

Je nutné si představit intenzitu  $I_i$  jako

proud záření dopadající na celou odvěsnu (šířka bude infinitezimální jednotka). Dále je nutné předpokládat, že koeficient absorpce není závislý na úhlu dopadu, neboť při teplotách tekutého kovu je tento blízký jedničce.

Je-li známa velikost vodorovné odvěsny a úhel (ten předpokládáme úměrný dopadající intenzitě), lze spočítat svislou odvěsnu. Protože známe rozdělení intenzity v dopadajícím svazku, rozdělíme si vzdálenost mezi osou svazku a nulovou intenzitou na určitý počet úseků – tím dostaneme jednotlivé intenzity  $I_i$ . Spočteme jednotlivé příspěvky k hloubce v těchto úsecích a jejich sečtením dostaneme celkovou ozářenou hloubku – resp. relativní délku úměrnou hloubce, do které se paprsek protaví. (24)





Podrobný postup výpočtu je zde uveden pro směsný mod ve vzdálenosti 10 mm od osy. Pro gaussův a upravený směsný mod jsou hodnoty dopočítány v tabulce č. 6.11. (24,33)

Zvolené hodnoty vzdálenosti od osy (-22 až 22)  $\mu\text{m}$ , aktuální poloměr  $w_{(z)}=0,011\text{mm}$  a šířka spáry  $R_{G,S}$  (0-0,20)mm jsou uvedeny v tabulce a budou použity pro výpočet Hermitových polynomů pro TEM00 a TEM01 Hermitův polynom Gaussova rozložení (13)

$$f_0\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right) = \exp\left[-\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2\right] \quad (6.20)$$

$$f_0\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right) = 0,438$$

Pro vzdálenost od osy 0 mm logicky odpovídá hodnotě 1. Hermitův polynom pro TEM01 rozložení (13)

$$f_2\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right) = 2\left[4\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2 - 1\right]\exp\left[-\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2\right] \quad (6.21)$$

$$f_2\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right) = 1,009$$

Pro vzdálenost od osy 0 mm logicky odpovídá hodnotě -1. Hermitův polynom pro směs modů (24)

$$f_{smes} = A \cdot f_0 + B \cdot f_2$$

$$f_{smes} = 3 \cdot \exp\left[-\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2\right] + 1 \cdot 2\left[4\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2 - 1\right]\exp\left[-\left(\frac{z}{w_{(z)}}\right)^2\right] \quad (6.22)$$

$$f_{smes} = 2,322$$

Dále při úvaze úhlu  $89^\circ$  a vzdálenosti 2,5 vyjdeme z rovnováhy  $\theta_S \cdot 2,5 = f_{smes} \cdot 89^\circ$

Úhel směsného modu (24)

$$\theta_S = \frac{f_{smes} \cdot 89}{2,5} \quad (6.23)$$

$$\theta_S = 82,657^\circ$$

Z úvodní teorie je pak délka směsi

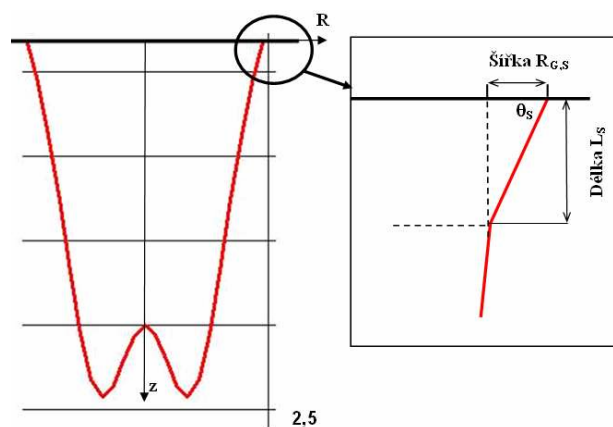
Délka směsného modu (24)

$$L_S = \frac{1}{\tan\left[(90 - \theta_S) \cdot \frac{\pi}{180}\right]} \quad (6.24)$$

$$L_S = 7,760 \text{ mm}$$

Hloubka v materiálu  $h_s$  je pak sou-

čet jednotlivých přírůstků délky směsného modu. (24)

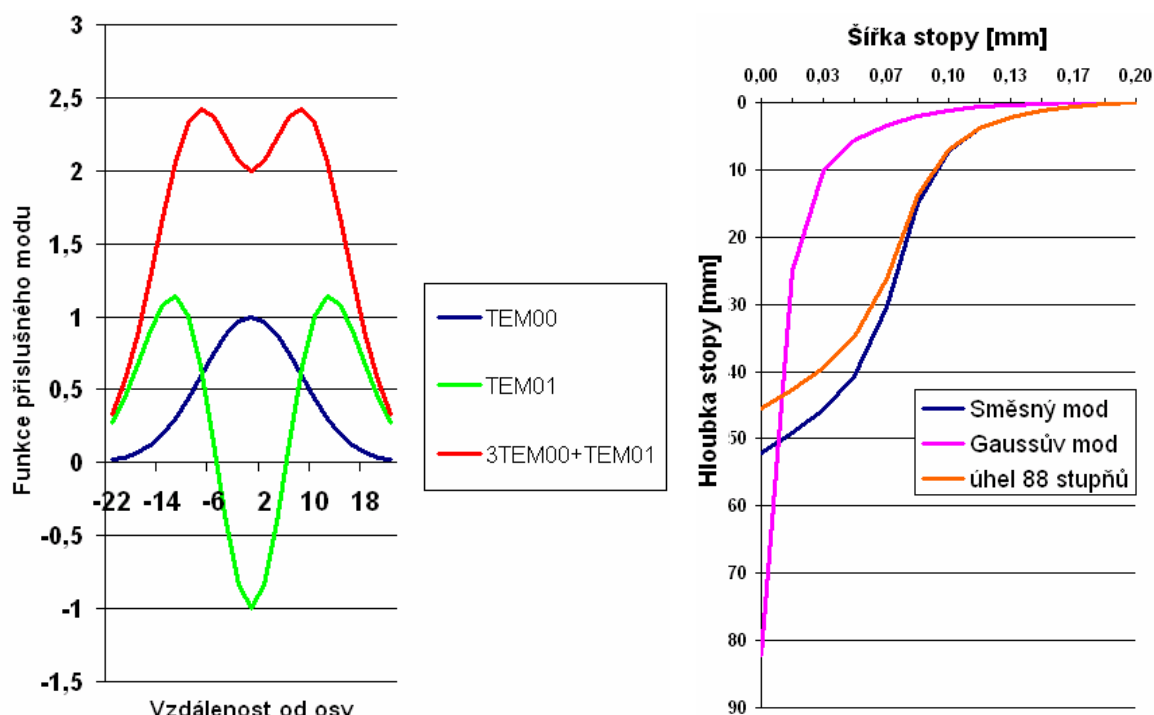


Obr. 6.21 Stanovení parametrů modu

Tab.6.11 Výsledné hodnoty modové struktury rozložení svazku

Vzdálenost od osy	Mod TEM00	Mod TEM01	Směsný Mod	$\Theta_g$ [°] Gauss	$L_g$ [mm] Gauss	$h_g$ [mm] Gauss	$\Theta_s$ [°] směsného	$L_s$ [mm] směsný	$h_s$ [mm] směsný	šířka $R_{g,s}$ [mm]	$\Theta_s$ [°] pro 88°	$L_g$ [mm] pro 88°	$h_g$ [mm] pro 88°
-22	0,018	0,275	0,330	1,630	0,028	0,000	11,737	0,208	0,000	0,20	11,605	0,205	0,000
-20	0,037	0,448	0,558	3,264	0,057	0,028	19,873	0,361	0,208	0,18	19,650	0,357	0,205
-18	0,069	0,667	0,874	6,116	0,107	0,085	31,097	0,603	0,569	0,17	30,747	0,595	0,562
-16	0,121	0,900	1,261	10,729	0,189	0,193	44,901	0,997	1,172	0,15	44,397	0,979	1,157
-14	0,198	1,085	1,678	17,616	0,318	0,382	59,748	1,715	2,169	0,13	59,077	1,669	2,136
-12	0,304	1,144	2,056	27,073	0,511	0,700	73,210	3,314	3,884	0,12	72,388	3,150	3,806
-10	0,438	1,009	2,322	38,947	0,808	1,211	82,657	7,760	7,198	0,10	81,728	6,878	6,956
-8	0,589	0,657	2,425	52,442	1,301	2,019	86,335	15,610	14,958	0,08	85,364	12,333	13,834
-6	0,743	0,141	2,369	66,096	2,256	3,320	84,341	10,092	30,568	0,07	83,394	8,634	26,167
-4	0,876	-0,413	2,216	77,976	4,695	5,576	78,879	5,087	40,660	0,05	77,992	4,701	34,802
-2	0,967	-0,840	2,063	86,106	14,691	10,271	73,439	3,363	45,747	0,03	72,614	3,194	39,503
0	1,000	-1,000	2,000	89,000	57,290	24,962	71,200	2,937	49,110	0,02	70,400	2,808	42,697
2	0,967	-0,840	2,063	86,106	14,691	82,252	73,439	3,363	52,047	0,00	72,614	3,194	45,505
4	0,876	-0,413	2,216										
6	0,743	0,141	2,369										
8	0,589	0,657	2,425										
10	0,438	1,009	2,322										
12	0,304	1,144	2,056										
14	0,198	1,085	1,678										
16	0,121	0,900	1,261										
18	0,069	0,667	0,874										
20	0,037	0,448	0,558										
22	0,018	0,275	0,330										

Druhá část se nemusí počítat neboť mody jsou rotační, takže se předpokládá i osová symetrie



Obr. 6.22a Tvar jednotlivých modů (24)

Obr. 6.22b Výsledný tvar stopy jednotlivých modů (24)

### Zhodnocení výsledků:

V grafu na (obr. 6.22a) jsou naznačené tvary jednotlivých modů a také směsného modu, který vznikl spojením. Tento výsledný směsný tvar byl porovnán se zkušebním vzorkem vypáleným do plexiskla a dokonale reprezentuje reálný mod, v kterém stroj pracuje. Do následujícího grafu (obr. 6.22b) pak byla vynesena šířka stopy  $R_{G,S}$  ve zvoleném kroku v závislosti na vypočítaných hloubkách stopy  $h_g$ ,  $h_s$  a  $h_s'$ , tedy výsledný tvar key hole. Porovnáme-li Gaussův a směsný mod je vidět do jaké míry zde má typ modu roli. Pro směsný mod má daleko menší spád a vzniká širší řezná spára. Poslední křivka je provedená pro zjištění, co se změní na tvaru otvoru, když se změní tepelná vodivost materiálu (úhel  $\Theta_s$  z  $89^\circ$  na  $88^\circ$ ). Je patrné snížení hloubky stopy. Tato projekce modu do roztaveného materiálu je ovšem pouze zkusmá, bylo by ji nutné upravit podle reálného měření. Nicméně, lze již učinit následující závěry:

Plocha absorbující záření dopadajícího svazku závisí na rozložení intenzity v daném modu a na aktuálním výkonu laseru. Zvýšíme-li řezný výkon, plocha se zvětší (prohloubí). (24)

Pro směsný mod není dále uveden výpočet vneseného tepla neboť oproti Gaussovu modu není řešení zdaleka tak triviální a směřuje na řešení Pekletových a Besselových funkcí.

Výsledkem vneseného tepla je proporce odebraného materiálu a je tedy na místě se zabývat co se s roztaveným kovem dále děje. Část je samozřejmě odpařená, ale pozice, kde už svazek nemá takovou intenzitu energie je materiál pouze nataven. Tavenina musí být z řezné spáry odstraněna prostřednictvím řezného plynu – v našem případě řezný kyslík 3,5. Průběh tohoto procesu je podrobněji zkoumán v následující kapitole.

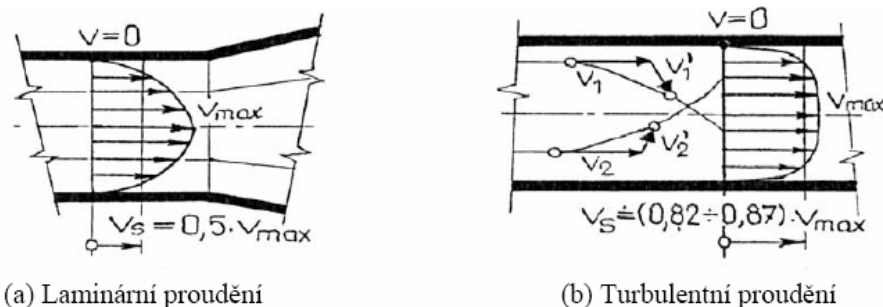
## 6.6 Princip proudění plynu v řezné spáře

Jakost povrchu je ovlivněná tloušťkou filmu roztaveného kovu vznikající uvnitř spáry během procesu. Proto je důležité chápat jak různé experimentální parametry ovlivňují tuto tloušťku.

Plyn vychází z konvergentní trysky konstantní průtokovou rychlostí, která je udržovaná v kritickém stavu. To je v případě, kdy poměr okolního tlaku stagnace je menší než 0,5283, což by odpovídalo rychlosti  $301 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  pro kyslík a ustálené teplotě 300 K. Předpokladem je, že vzdálenost trysky od povrchu je malá a hlavně udržuje se konstantní po celou dobu řezu. Teoretický tok mezní vrstvy přes rovinou plochu, lze pak aplikovat pro výpočet vzdálenosti, po které dojde k odtržení proudu prostřednictvím kritického Raynoldsova čísla-Re. (34,35)

Reynoldsovo číslo dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor v důsledku vnitřního tření). Když hodnota Re překročí hodnotu 2300 (tzv. Bod odtržení), změní se proud na turbulentní (částice má ustálený pohyb a flukтуаční složky rychlosti). Okamžitým následkem je, že část vnesená plynem se rapidně sníží a již nedovede účinně vyhodit roztavený kov z řezné spáry. To má dva efekty: prvním je, že na stěnách se začne hromadit vrstva roztaveného kovu a druhým, že se v důsledku vzdušnosti změní difúze kyslíku v železe, čímž se sníží kvalita řezu. Pro udržení jednotné kvality řezu je zapotřebí zachovat laminaritu proudění. (34,35)

Za předpokladu linearitu rychlostního profilu je maximální rychlost taveniny na rozhraní tavenina/plyn a nulová rychlost na rozhraní tavenina/pevná látka. Průměrná je potom ( $v_{\text{stř.}} = v_{\text{max}}/2$ ).



Obr. 6.23 Laminární a turbulentní proudění (34)

### Výpočet rychlosti proudění plynu

#### 1. Pomocí Bernoulliovy rovnice:

Zákon zachování energie –Bernoulliova rovnice (34)

$$\frac{v_v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h = konst. \quad (6.25)$$

$$kinetická + tlaková + potenciál = konst.$$

Zjednodušující kritéria:

Potenciální energii byla zanedbána a předpokládá se, že tlaková energie (uvnitř trysky = poloha 1) se zcela přemění v pohybovou energii (mimo trysku = poloha 2). Dále tedy rychlost v poloze 1 bude nulová a tlak v poloze 2 bude atmosférický. Vliv tření o stěny je také zanedbán. Potom při uvažovaném nejvyšším tlaku  $p_1 = 0,04 \text{ MPa}$ ;  $\rho = 1,429 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ :

Upravená Bernoulliova rovnice

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_v^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \Rightarrow v_v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_1}{\rho}} = 238 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tento výpočet má nevýhodu, že nezávisí na průměru trysky a má ne zcela přesný předpoklad jen statického tlaku uvnitř trysky. (35)

#### 2. Pomocí objemového průtoku

Objemový průtok a výtoková rychlost (34)

$$Q_v = S_T \cdot v_v \Rightarrow v_v = \frac{Q_v}{S_T} \quad (6.26)$$

$$v_v = 265 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kde  $S$  je plocha trysky ( $= \pi r^2$ ). Průměr trysky je 2,0 mm a  $v$  je výtoková rychlost. Spotřeba kyslíku (odhadovaná) je  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ .

V tomto případě explicitně nezávisí na tlaku a pro přesnou hodnotu by musel být zařazen do přívodu průtokoměr. Je také vidět, že proud plynu má podzvukovou rychlost. (24)

#### 3. Pomocí rovnic laminárního proudění

Určení rychlostního profilu pro laminární proudění (34)

$$Q_v = \int dQ_v = \frac{i}{4\eta} \cdot 2\pi \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr = \frac{i \cdot \pi \cdot R^4}{8\eta} \quad (6.27)$$

$$i = \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad S = \pi \cdot R^2 \quad (6.28)$$

$$v_v = \frac{Q_v}{S} = \frac{1}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot R^2 = 247 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kde  $\eta$  je dynamická viskozita ( $18,9 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\Delta p = 0,04 \text{ MPa}$  je tlaková difference na délce  $\Delta l = 20,3 \text{ mm}$  - tloušťka plechu a  $R$  = polovina šířky řezné spáry. V tomto výpočtu je nevýhodou, že geometrie řezné spá-

ry je jiná než geometrie trubice. Je zajímavé, že všechny metody přesto dávají vcelku shodné výsledky.

Tab.6.12 Souhrnná tabulka rychlosti plynu

Bernaulliva rovnice	Objemový průtok	Laminární proudění
$v_v = 238 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_v = 265 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_v = 247 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Reynoldsovo číslo (34)

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d_x}{\nu} \quad (6.29)$$

$$\text{Re} = 2338$$

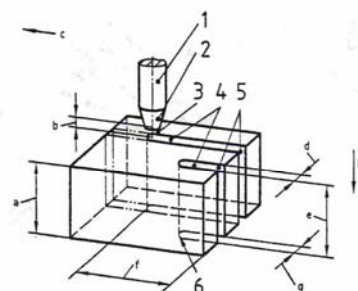
$\nu$  představuje kinematickou viskozitu a pro kyslík je  $\nu = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $d_x$  je průměr vzniklé mezery cca = 0,15 mm.

I když je výsledek silně degradovaný použitím zjednodušujících předpokladů, včetně zanedbání ztrátového součinitele lze konstatovat závěr, že dle Reynoldsova čísla se do jisté míry chová plyn jako autoregulační. Proud je na hranici laminarity a rychlost postupně narůstá, zvětšuje se množství taveniny ulpěné na stěně a tak zvětšuje průměr  $d_x$ , tím brzy přejde laminární proud v turbulentní a rychlost prudce klesne a průměr  $d_x$  se zmenšuje až dojde opět k přechodu na laminární proudění.

Tento proces do jisté míry má vliv na kvalitu řezu ve spodní oblasti řezu, popřípadě u nízké výtokové rychlosti také na tvorbu okují. Naopak vysoká rychlost plynu by měla za následek turbulenci, při které je zcela porušena rovnováha toku v paroplynovém kanálu a rapidní zhoršení kvality řezu. (24)

## 7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Vyhodnocení bylo provedeno na základě platné normy pro tepelné dělení materiálů ČSN EN ISO 9013:2002. Tato norma obsahuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezu. (36)



Vysvětlivky:

1 Řezací hořák

2 Hubice

3 Paprsek(laseru)/plamen/oblouk

4 Řezná spára

5 Začátek řezu

6 Konec řezu

a Tloušťka zpracovávaného kusu

b Vzdálenost trysky

c Směr posunu

d Šířka řezné spáry na horní ploše

e Řezná tloušťka

f Délka řezu

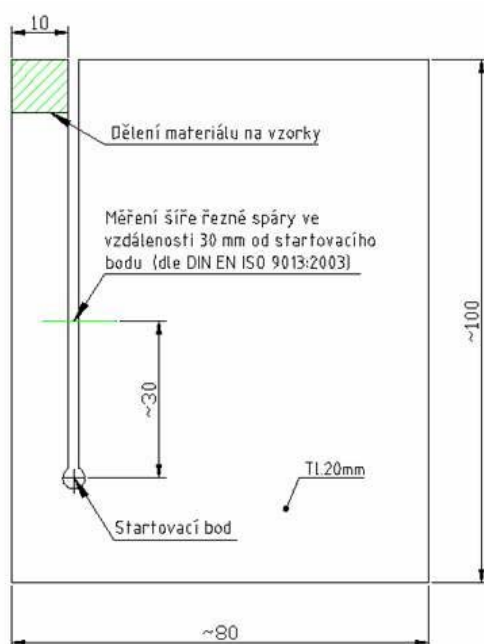
g Šířka řezné spáry na spodní ploše

h Směr řezání

Obr. 6.24 Vyhodnocení vzorků (36)

Řezaný rozměr (100x80x20(18,8))mm. Startovací bod byl umístěn zhruba 20 mm od spodního okraje. Všechny vzorky v sérii byly vyřezány tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění sousedního vzorku.

Série s 20 mm obsahovala 14 kusů, série s 18,8 mm měla 6 kusů, na nichž byly v kombinaci vyzkoušeny nastavení různých řezných parametrů. Konstantou byl zvolen řezný výkon. Za proměnné pak řezná rychlost, tlak plynu a ohnisková vzdálenost. Volba těchto proměnných byla zvolena z důvodů možnosti korekce a kontroly na řezacím laserovém zařízení. (36)

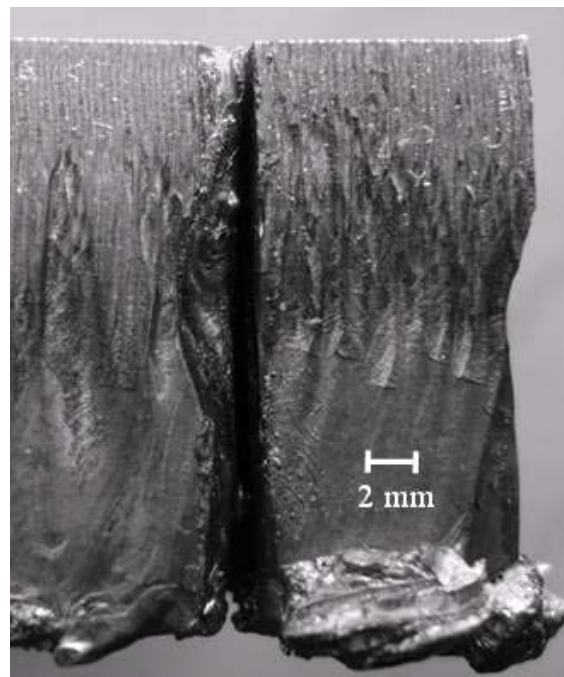


Obr. 6.25 Výroba vzorků



## 7.1 Šířka řezné spáry

Zvětšuje se s tabulovou tloušťkou plechu a je obvykle užší ve spodní části řezu. Představuje vzdálenost mezi povrchy řezu na horní a spodní straně řezu nebo pokud došlo k natavení horní hrany, bezprostředně pod tímto natavením hrany, způsobené řezáním. Její hodnota se pohybuje v rozmezí (0,05–1,5) mm v závislosti na tloušťce materiálu. Obecně je cílem generovat nejužší možný řez, tím minimalizujeme množství odstraněného materiálu. Úzké spáry v silném materiálu zapříčiňují potíže s vyfouknutím materiálu v tom případě je dosaženo lepších výsledků s širšími spárami.

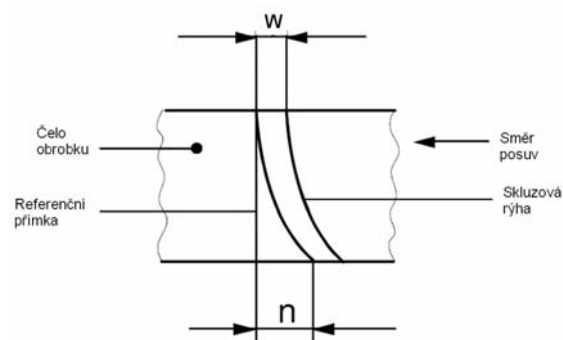


Obr. 6.26 Řezná spára

Způsob měření: Na dílenském mikroskopu ve vzdálenosti 30 mm od startovacího bodu na součásti po obou stranách (viz. Tab. 6.17). (36)

## 7.2 Skluz – n, rozteč skluzových rýh – w, linie na materiálu- m

Průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Při zpracování tlustých plechů za vysoké řezné rychlosti již nevystupuje roztavený kov z řezu svisle zespod svazku, ale místo toho vychází mírně za svazkem. Následkem toho jsou právě křivočaré rýhy zanechané bezprostředně za svazkem ve směru pohybu. (36)



Obr. 6.27 Skluzové rýhy (36)

Způsob měření: Měření bylo provedeno na dílenském mikroskopu najetím na referenční přímku a horizontální odjetí na konec rýhy materiálu.

w – je difference mezi referenční přímkou a nejbližší skluzovou rýhou

m – je část úseku skluzových rýh, která je kolmá (ještě nedochází k zakřivení). (36)

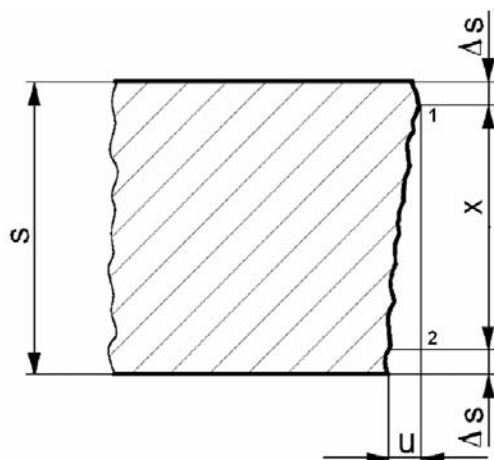
Naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulce (tab.6.17)



### 7.3 Odchylka kolmosti nebo odchylka úhlu- u

Vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (dotýkajícími se řezného povrchu), mezi které je vepsán profil povrchu řezu. Přímký svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel ( $90^\circ$  v případě svislých řezů)

Způsob měření: běžně se provádí na číselníkovém indikátoru, zde bylo provedeno pomocí vyhodnocení digitální fotografie. Nejprve je nutno určit hodnotu  $\Delta s$  (odvíví se z tloušťky materiálu -



Obr. 6.28 Odchylka kolmosti (36)

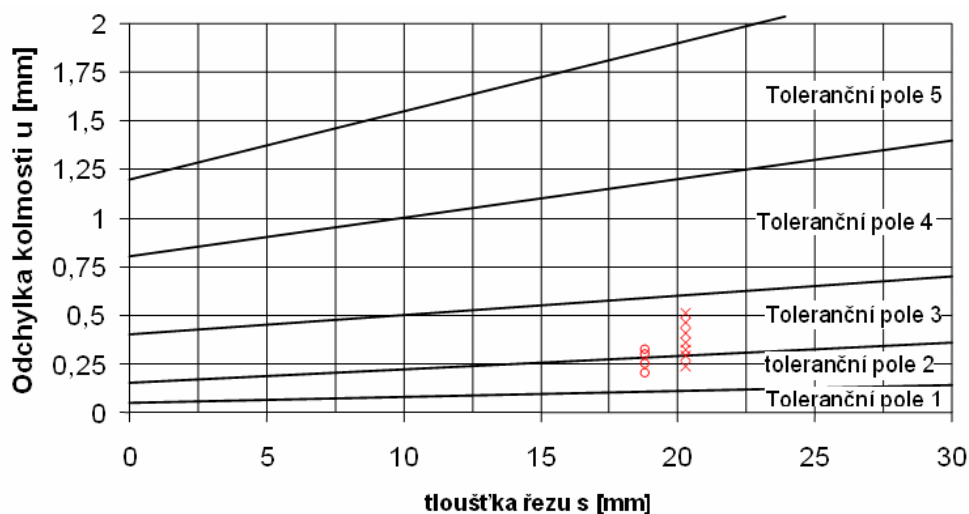
s), která se odečte z obou stran pro eliminaci chyb vlivem hrubých okrajů. Dále se do těchto bodů (1;2) umístí kolmice a difference mezi nimi je hledaná hodnota  $\underline{u}$ . (36)

Měřená délka X bude:      pro 20,3 mm  $\rightarrow$  17,3 mm       $\Delta s = 1,5$  mm  
(Dle normy)              pro 18,8 mm  $\rightarrow$  16,8 mm       $\Delta s = 1,0$  mm

Dané hodnoty tolerančních polí jsou dle normy spočítány a uvedeny v následující tabulce pro tloušťku plechu 20,3 a 18,8 mm:

Tab.6.13 Hodnoty u pro toleranční pole (36)

toleranční pole	u (pro tloušťku 20,3 mm)	u (pro tloušťku 18,8 mm)
1	0,1109 mm	0,1064 mm
2	0,2921 mm	0,2816 mm
3	0,603 mm	0,588 mm
4	1,206 mm	1,176 mm
5	0,8526 mm	1,858 mm



Obr. 6.29 Umístění vzorků do tolerančních polí

Tab.6.14 Umístění vzorků v tolerančních polích

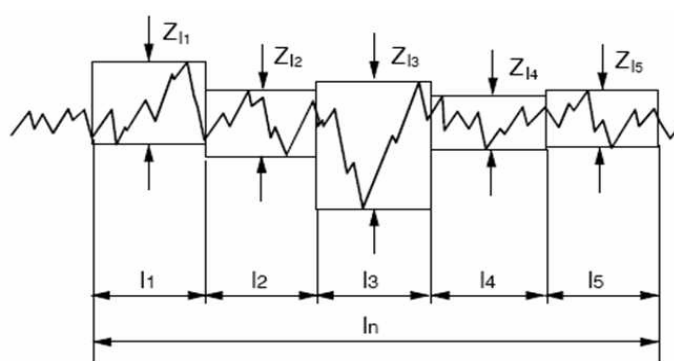
toleranční pole	vzorky č.
2	14, 1J, 2, 3J, 2J, 5J
3	8, 3, 7, 9, 12, 5, 11, 10, 6, 4, 13, 1, 6J, 4J

Vzorky jsou v tabulce poskládány sestupně v pořadí dle hodnoty  $u$ . Vzhledem k tloušťce materiálu pro jednotlivá toleranční pole činí pro vzorky v poli č.2 hodnotu úchytky kolem 0,25 mm a v poli č.3 okolo 0,5 mm. Proto v případě, kdy mají součásti lícovat je rozdíl mezi tolerančním polem 2 a 3 patrný pouhým okem.

#### 7.4 Průměrná výška prvků profilu, $Rz_5$

Jedná se o aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách. Má za následek nedodržení předepsané tolerance povrchu na výrobku a je nutné volit další operaci.

Měření: Materiál nad tloušťku 2 mm je měřen ve 2/3 tloušťky.



$Z_{l1}$  to  $Z_{l5}$  Struktura povrchu v části  $l_n$  Celková měřená část  
 $l_1$  to  $l_5$  Délka individuálního úseku

Obr. 6.30 Struktura povrchu (36)

Měření nebylo provedeno z důvodů absence potřebného zařízení (profilometr).

Tab.6.15 Hodnoty  $Rz_5$  pro toleranční pole (36)

toleranční pole	$Rz_5$ (pro 20,3 mm)	$Rz_5$ (pro 18,8 mm)
1	22,18 $\mu\text{m}$	21,28 $\mu\text{m}$
2	56,24 $\mu\text{m}$	55,04 $\mu\text{m}$
3	94,36 $\mu\text{m}$	92,56 $\mu\text{m}$
4	146,54 $\mu\text{m}$	143,84 $\mu\text{m}$

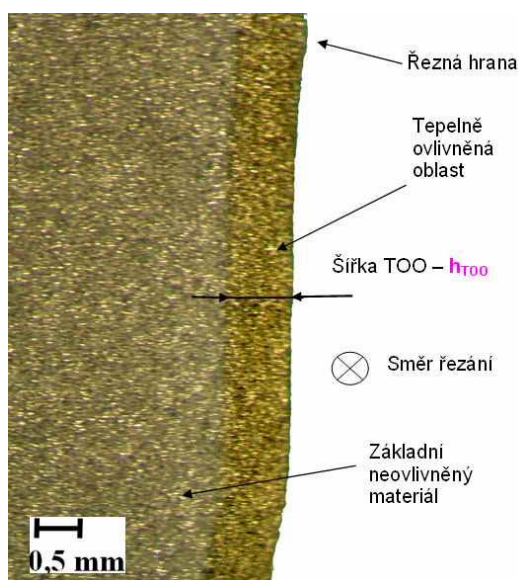
#### 7.5 Tepelně ovlivněná oblast (HAZ)

HAZ –(heat aspect zone) je tvořená úzkým pásmem vysokého přehřátí s hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturou. Tato přechází do úzké oblasti normalizačního žíhání s jemnozrnnou strukturou a podstatně širším pásmem částečné překrystalizace. V nízkouhlíkových ocelích je zpevňující účinek menší, ale v středně, vysoce-uhlíkových ocelích se blíží k jeho maximální tvrdosti. Toto může mít stinné stránky jestli oříznutá součást potřebuje podstoupit operaci ohýbání. V nejvyšší uhlíkovém obsahu (0,8% ne-

bo více) prudký tepelný cyklus může samovolně generovat trhliny v řezné hraně.

Hloubka HAZ souvisí s řeznou rychlostí, směrem k vrcholu řezného okraje je obecně několik desítek mikrometrů. Akumulace tepla může nastat při řezu detailů v jedné oblasti (např. ozubení). Pokud na okraji nevznikly mikrotrhliny během řezu, HAZ může být odstraněn vhodnými žíhacími cykly. (15)

Způsob měření: vzorky byly vyleštěny a následně naleptány nitem. Dále provedena makroskopie ve 4x zvětšení a odměření rozhraní zhruba v ½ výšky materiálu.



Tab.6.16 Hodnoty  $h_{TOO}$

Vzorek č.	$h_{TOO}$	Teplo - Q
1	612 $\mu\text{m}$	29,44 J
7	996 $\mu\text{m}$	48,22 J
13	948 $\mu\text{m}$	32,85 J
14	715 $\mu\text{m}$	19,17 J
4J	752 $\mu\text{m}$	25,60 J
6J	680 $\mu\text{m}$	19,78 J

Rozměry byly odměřeny zhruba v polovině výšky plechu. Pro ostatní vzorky se nepodařilo hodnotu  $h_{TOO}$  určit.

Obr. 6.32 Šířka tepelně ovlivněné oblasti

Je patrné, že s nárůstem hodnoty vneseného tepla při stejné řezné rychlosti narůstá i hodnota  $h_{TOO}$ . Je také odvislá od řezné rychlosti, která udává dobu interakce s materiálem.

## 7.6 Ostatní parametry

### **Utváření hrubého okraje:**

Prohlubeniny nebo zářezy nepravidelné šířky, hloubky a nepravidelného tvaru, zejména ve směru řezné tloušťky, které naruší jinak stejnorodý povrch řezu. Odstranění otřepů z řezných hran vždy vyžaduje další pracovní operaci. (36)

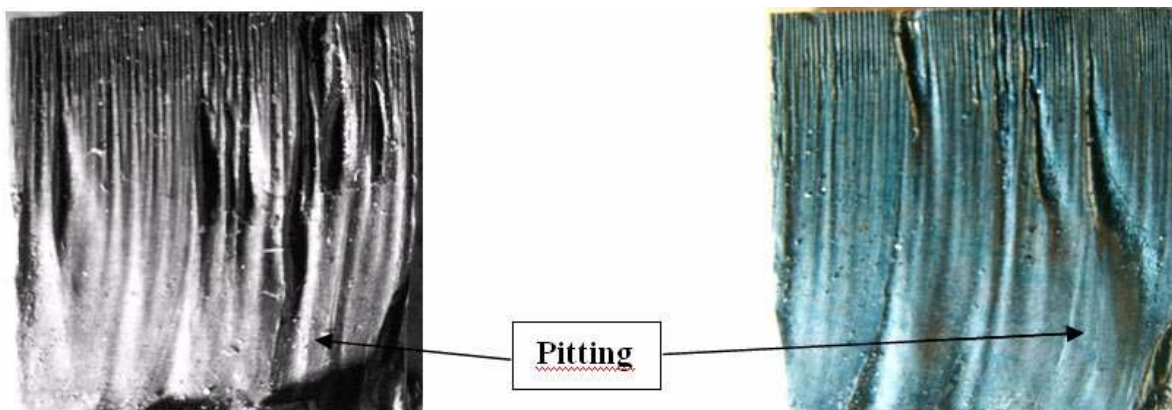
### **Únavová životnost:**

Při řezu nízkouhlíkové nebo nerezové oceli užívané ve všeobecném strojírenství je zřídka potřeba zájmu o tento efekt avšak jisté aplikace

např. letecké díly tyto vlastnosti musí splňovat. Řezání laserem je termický proces schopný řezu jemného detailu. Řezná hrana podstupuje prudký tepelný cyklus, který může být doprovázený lokalizovanou chemickou reakcí jejíž následkem je vysoká okrajová tvrdost (zakalení) a ztráta tažnosti. (12)

#### **Důlková koroze a eroze (Pitting):**

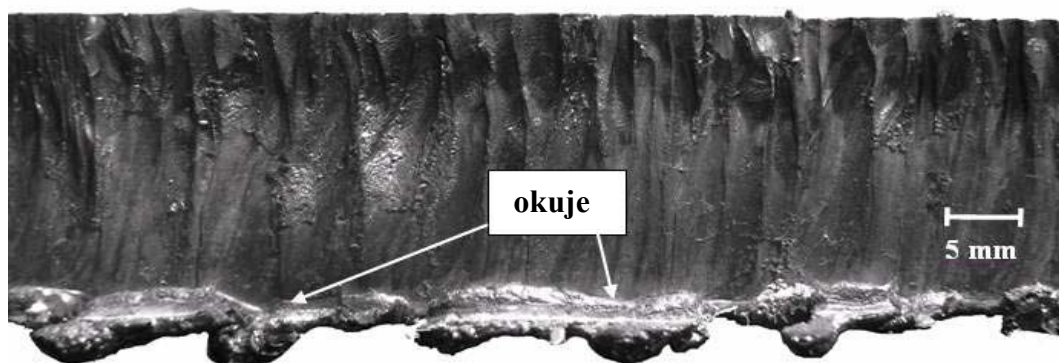
Může nepříznivě ovlivnit povrch řezu. Kvalita plechu zde hraje důležitou roli: může obsahovat cizí substance jako sulfid, který hoří neovladatelně a tím způsobuje důlkové eroze. (15)



Obr. 6.31 Pitting efekt

#### **Tvorba okují :**

Asistenční plyn řezného procesu vyhání roztavený kov ze spodní části řezu. Část z tohoto kovu zůstává připojená k obrobku v podobě okují nebo strusky. Tato vlastnost je často nepřijatelná. Při kyslíkovém řezu uhlíkové oceli se okuje objevují v případě, když ohnisko je nesprávné, tlak plynu je příliš nízký, nebo rychlost translace vysoká. Tato podmínka je vyřazena zvýšením tlaku plynu nebo řezné spáry, nátěry jako grafit nebo uhlíčan hořecnatý mohou být užity pro redukci soudržnosti roztaveného materiálu na hranici. (20)



Obr. 6.33 Ukázka tvorby okují

Tab.6.17 Výsledné hodnoty parametrů zkoumaných vzorků

číslo vzorku	tl.materiálu s [mm]	spára horní [mm]	spára dolní [mm]	počet vrubů [ks]	linie mat. šířka-w [mm]	linie mat. poloha-n [mm]	rovná část m [mm]	kolmost u [mm]	pitting (%)
1	20,30	0,64	1,03	47	0,21	2,4	4,12	0,32	10-15
2	20,30	0,58	1,07	40	0,24	2,87	4,18	0,24	60-70
3	20,30	0,66	1,24	48	0,20	1,65	5,53	0,46	80-90
4	20,30	0,68	1,06	34	0,32	1,80	4,37	0,33	30-40
5	20,30	0,7	1,23	42	0,25	1,49	5,19	0,40	5-8
6	20,30	0,54	0,92	38	0,26	1,51	5,60	0,36	20-30
7	20,30	0,61	1,07	46	0,22	1,97	5,44	0,41	40-50
8	20,30	0,59	1,18	48	0,21	1,69	5,71	0,51	50-55
9	20,30	0,72	0,92	44	0,24	1,89	2,68	0,40	20-25
10	20,30	0,89	1,09	35	0,29	2,66	1,74	0,36	35-40
11	20,30	0,56	0,76	49	0,20	1,92	3,25	0,38	12-17
12	20,30	0,57	0,92	43	0,24	2,16	3,48	0,40	8-12
13	20,30	0,62	1,06	41	0,25	1,93	4,35	0,32	5-8
14	20,30	0,72	0,98	48	0,21	2,27	2,51	0,29	6-10
1J	18,80	0,57	0,88	51	0,21	1,22	3,98	0,25	0
2J	18,80	0,48	0,73	45	0,23	0,99	3,29	0,20	0
3J	18,80	0,52	0,82	45	0,24	1,88	3,12	0,22	0
4J	18,80	0,53	0,78	47	0,23	2,91	3,55	0,30	0
5J	18,80	0,54	0,72	49	0,21	2,33	3,83	0,19	0
6J	18,80	0,59	0,76	36	0,27	2,25	3,98	0,32	0



**Zhodnocení ostatních výsledků měřených hodnot:**

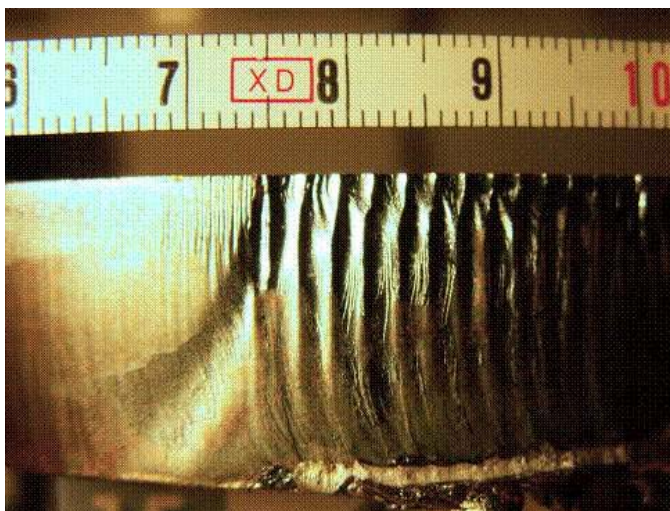
**a) Tloušťka materiálu:** skutečná naměřená tloušťka série 20 mm byla 20,3 mm, což je dáno výrobní tolerancí, která činí  $(-0,6 \div 1,3)$  mm. Japonský materiál pak 18,8 mm.

**b) Řezná spára:** směrem k spodnímu okraji materiálu se rozšiřuje, dle předchozích definic. Pro polohu ohniska (0)-vzorek č.7 byl průměr svazku na povrchu materiálu spočítán 0,92 mm a zde je horní spára 0,61 mm. Je to dáno tím, že okrajová část svazku již nemá potřebnou energii a také dochází na okraji k rozptýlu.

**c) Počet vrubů:** Největší počet 51 vrubů vykazoval vzorek č.1J. Obecně se však u japonského materiálu jednalo o velice jemné vruby tvořící kvalitní povrch. Naproti tomu hrubé vruby s největší četností byly u vzorků 8,11,14. Tedy tam, kde je vysoká hodnota vneseného tepla s následnou deformací povrchu

**d) Rovná část m:** Podle této vzdálenosti byly stanoveny jednotlivé polohy ohniska uvnitř materiálu během řezu. Pak tedy odpovídá poloze ohniska (0) hloubka v materiálu 6 mm.

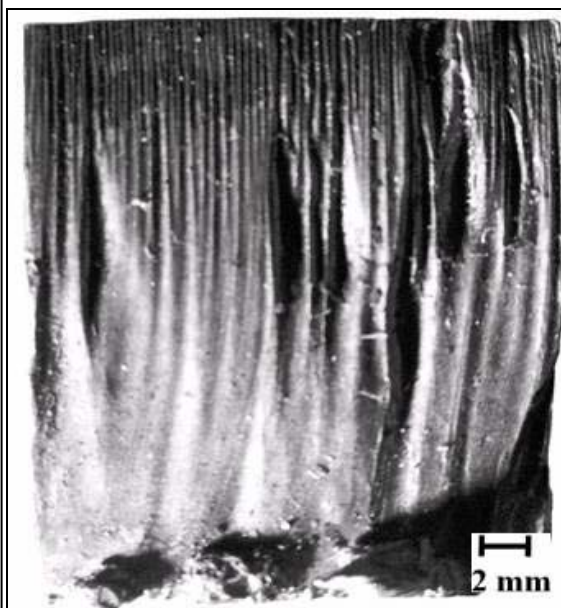
Po provedení dalších testů bylo zjištěno, že široký řez vzniká i za jiných vlivů, než je pouze vnesené teplo. Pokus obsahoval vyříznutí součásti kruhového tvaru za konstantní řezné rychlosti i ostatních parametrů (ohnisko, výkon, tlak plynu) a sousední tepelné ovlivnění nebylo u kruhu možné. Výsledkem bylo zcela neočekávané objevení širokého řezu asi v 1/3 oříznutého kruhu. Tento se objevil náhlým přechodem z hladkého řezu bez okují viz. (obr. 6.34). (24)



Obr. 6.34 Kruhová Součást (24)

Pravděpodobně jediným možným vysvětlením je vada v materiálu, tedy jinačí chemické složení, které porušilo termodynamickou rovnováhu řezu. Toto tvrzení by však vyvrátilo nebo naopak pouze chemický rozbor materiálu po jednotlivých vrstvách.

### Indikace vybraných vzorků



Vzorek č.8

Parametry:

$v_c = 600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$   $p = 0,01 \text{ MPa}$

Poloha ohniska = -1

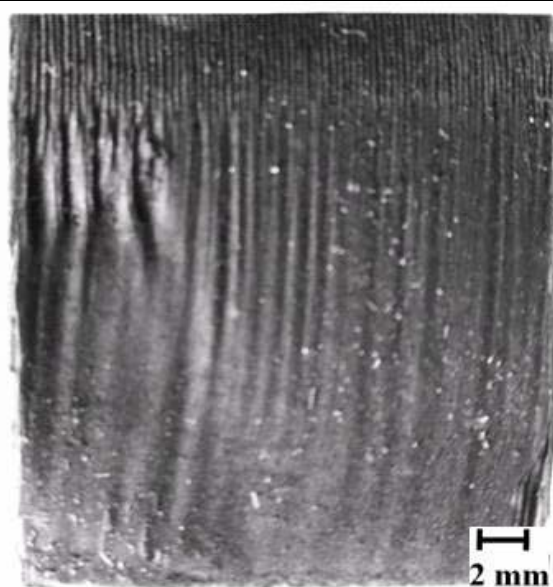
Řez vykazuje až 60% pitting.

Poloha ohniska (-1) vyvozuje největší podíl vneseného tepla a tím velice hrubý řez.

Na spodní hraně jsou vidět silné okuje. Obrobek je do tabule silně zapečen a je obtížné jej vyrazit.

Povrch je z hlediska vzhledu a geometrické tolerance nepřijatelný.

Musí následovat další operace



Vzorek č.9

Parametry:

$v_c = 600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$   $p = 0,01 \text{ MPa}$

Poloha ohniska = +3

Je patrná korekce rychlosti při akceleraci svazku do řezu. Vlivem malé rychlosti na začátku řezu je velké množství vneseného tepla a tím i špatný povrch. Tento se vyhlazuje až zcela zmizí po dosažení správné rychlosti.

Tím jsou všechny hrany na obrobku sražené s nedodržením geometrické přesnosti.

Zbytek řezu je kvalitní s malým podílem vneseného tepla.

Obr. 6.35 Indikace vybraných vzorků č.8 a 9

Obecně kvalitnějšího řezu bylo dosaženo u japonského materiálu, který je podstatně dražší než Laser Raex 250C. Bylo by vhodné znát jeho chemické složení pro možnost porovnání a úsudku, toto však nebylo k dispozici.

Ukázka zbývajících vzorků se nachází v PŘÍLOZE č.1, 2, 3.

Dále v PŘÍLOZE č.4,5 jsou uvedeny obrázky obrobku po oříznutí ještě před vyjmutím z tabule plechu pro ukázkou možnosti zapečení obrobku.

Nejhůře se pak vytloukaly vzorky č. 2,3,7,8

## 8 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Jeden způsob, jak počítat cenu je kalkulace procesu za hodinu (nebo na jednotku délky řezu), při amortizaci některý z nejvýznamnějších nákladů do hodinového propočtu. Do celkové kalkulace patří řada položek z kterých se dále odvíjí výrobní cena. Zde je uveden teoretický propočet nákladů spojených se samotným řezem. Parametry, jako odpisy stroje a mzdové náklady atd. nejsou zahrnuty.

### Teoretický propočet:

Součásti byly řezány dle normy s můstkem 10 mm v obou osách.

Počet kusů varianty A<sub>x</sub> v ose x

$$P_{vAx} = \frac{(3000 - 20 - 10)}{110} = 27 \text{ ks}$$

Počet kusů varianty A<sub>y</sub> v ose y

$$P_{vAy} = \frac{(1500 - 20 - 10)}{90} = 16,33 \text{ ks}$$

Počet kusů varianty A celkem

$$P_{vA} = 27 \cdot 16 = 432 \text{ ks}$$

Počet kusů varianty B<sub>x</sub> v ose x

$$P_{vBx} = \frac{(3000 - 20 - 10)}{90} = 33 \text{ ks}$$

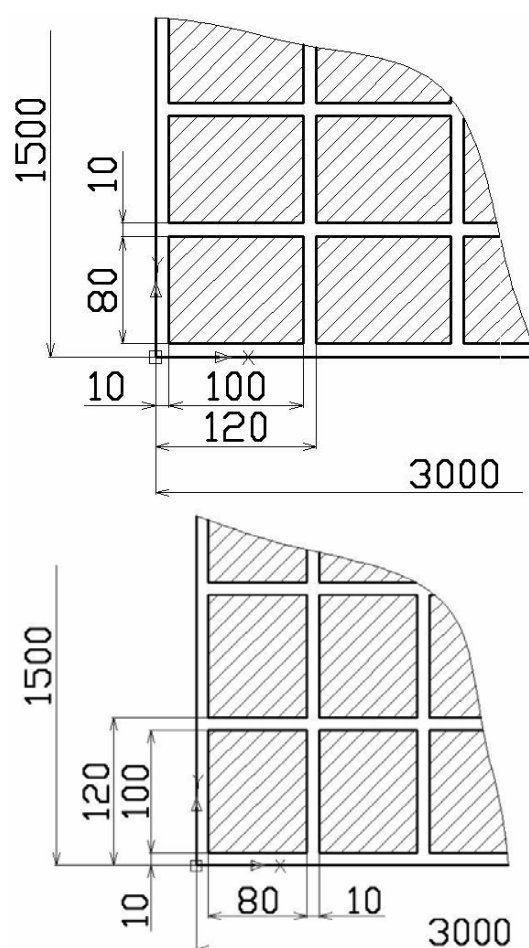
Počet kusů varianty B<sub>y</sub> v ose y

$$P_{vBy} = \frac{(1500 - 20 - 10)}{110} = 13,36 \text{ ks}$$

Počet kusů varianty B celkem

$$P_{vB} = 33 \cdot 13 = 429 \text{ ks}$$

Výhodnější je varianta A o 3ks



Obr. 7.1 schéma řešení materiálu

Celková délka 1 kusu : jedná se o obdélník o stranách 80x100 + 80 mm je od startovacího bodu.  $L_{Ks} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 100 + 80 = 440 \text{ mm}$

Čas na jeden kus :

$$t_{Ks} = \frac{L_{Ks}}{v_c}$$

Celkový čas tabule (432 kusů):

$$t_{tab} = t_{Ks} \cdot 432$$



Tab.7.1 Doba řezání

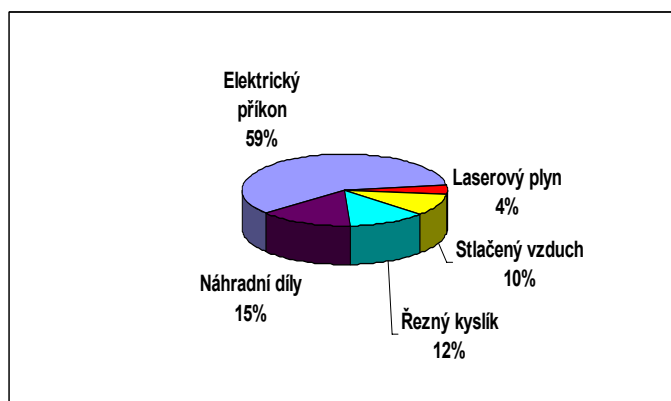
Rychlost - $v_c$ [mm·min <sup>-1</sup> ]	500	550	600	700	800	900
Čas jednoho kusu $t_{ks}$ [min]	0,88	0,80	0,73	0,63	0,55	0,48
Čas celé tabule (432 ks) $T_{Tab.}$ [min]	380,16	345,60	316,80	271,44	237,60	210,96

Z tabulky plyne míra vlivu řezné rychlosti na výrobní čas a tím i cenu součásti. Z ekonomického hlediska by je na první pohled jednoznačný rozdíl mezi rychlostmi (500 a 900 mm.min<sup>-1</sup>) a to 169,2 minuty, ale praxe ukázala s rostoucí rychlostí k horním hranicím zvětšování počtu zmetkových kusů až na cca 20% výroby. Pak je tedy nutné do celkové ceny výrobku započítat i cenu zmetků ať již zmetků neopravitelných nebo cenu související operace, která vadu odstraní. (24)

Typické řezné systémy využívající CO<sub>2</sub> lasery mají provozní náklady obecně definované v (tab.7.2)

Tab.7.2 Ekonomické proporce (24)

Položka	Cena [Kč/hod]
Elektrický příkon	200
Laserový plyn	12
Stlačený vzduch	35
Řezný kyslík	41
Náhradní díly	50
CELKEM	338



Obr. 7.2 Odebraný objem

Kalkulace materiálu:

Tab.7.3 Ceny materiálu ke dni 4. 5. 2008 tabule válcovaná za tepla (37)

Materiál	Rozměry [mm]	Cena [Kč/kg]	Cena [Kč/tabule]
Raex 250 C	20 x 1500 x 3000	43,87	31 016
Raex 355 MC	20 x 1500 x 3000	45,42	32 066
S235JRG1	20 x 1500 x 3000	28,38	20 433
Alform	20 x 1500 x 3000	45,00	31 770

Výrobní cena součástky 80x100x20 mm z materiálu laser Raex 250C byla ohodnocena firmou Dendera a.s. na 28,50 Kč/kus.

## ZÁVĚR

Zadáním a předmětem této diplomové práce bylo řešení problematiky výskytu širokého řezu na tabulích plechu tloušťky 20 a 18,8 mm ve firmě Dendera a.s. s návrhem řešení.

Rozsah a výsledky práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- Propočet rozložení intenzity v radiálním a axiálním směru pro Gaussův svazek ukázal, že pokles intenzity má v ose zhruba exponenciální průběh, ale v radiálním směru je pokles mnohem prudší.
- Prostřednictvím znalosti rozložení intenzity ve svazku a následnou kvantifikací interagující plochy svazku s materiálem lze spočítat množství vneseného tepla do řezu, které úzce souvisí s výskytem širokého řezu. Následné porovnání se vzorky ukázalo, že největší vliv na množství vneseného tepla do řezu má právě poloha ohniska vůči materiálu (až 100 % nárůst). Menší vliv má pak rychlost řezání (30%).
- Dále je uveden propočet skutečného průběhu svazku a stopy v materiálu, pro zjištění odlišnosti od Gaussova svazku, se kterým bylo počítáno. Pro reálný průběh rozložení intenzity svazku má stopa mnohem menší spád a je širší. Rozdílné je i konvexní uspořádání.
- Kvantifikací způsobu odstranění roztaveného kovu z řezné spáry lze popsat princip na kterém funguje. Rychlosti toku a Reynoldsovo číslo ukazuje systém jisté autoregulace kritické hodnoty mezi laminárním a turbulentním prouděním.
- Z celkového vyhodnocení tedy plyne, že efekt širokého řezu se pro dané materiály objevuje náhle při hodnotách vneseného tepla nad 30 J nebo při nízké řezné rychlosti. Vysoká hodnota vneseného tepla způsobuje silné natavení, širokou řeznou spáru, nerovnoměrný povrch a také zapečení na spodním okraji řezu. Nízká rychlost pak vysoké místní natavení – pitting materiálu a hrubý povrch s nedodržením předepsaných tolerancí. Do 600 mm.min<sup>-1</sup>, kdy řezná hrana velice zhrubne nebo v místech kde musí být rychlost korigována (hrany, složité tvary). Je proto nutné se zcela vyvarovat poloze ohniska  $f = (0)$  a  $(-1)$  odpovídající hloubce ohniska v materiálu (6 mm) a (7 mm). Dále pak kombinací polohy ohniska  $f = (+1)$  a současně řezným rychlostem pod 600 mm.min<sup>-1</sup> pro daný typ materiálu. Tlak přiváděného kyslíku 3.5 by neměl klesnout pod hranici 0,03 MPa. Tyto závěry byly ověřeny na testech zkoušeného materiálu v praxi.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. BENKO, B., a kol. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita STU: Strojnícka fakulta, 2000. 122 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. KUSALA, J., *Svět energie: Lasery kolem nás*. [online]. 2004, [cit. 2008-03-15]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>>.
3. MELLES GRIOT. *Introduction to laser technology: Basic laser principles*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-20]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X\\_36\\_2-5.pdf](http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X_36_2-5.pdf)>.
4. STEEN, W.M. *Laser Material Processing*. 1st. edition. Verlag Berlin Heidelberg New York: 2001. 266 s. ISBN 0-387-19670-6.
5. HALÁSEK, J., a kol. *Laser*. 1. vyd. Praha: autorský kolektiv laserové laboratoře státního výzkumného ústavu materiálů, 1989. 111 s.
6. EUROLASER ACADEMY :Laser Beams And Optical Resonators - Course 2. [CD-ROM] Ver. 1.05 for Microsoft Internet Explorer 5, Netscape Navigator 4.7. Technischen Universität Wien, 2000.
7. SILFVAST, W.T. *Laser fundamentals*. 2nd edition. Cambridge University: 1996. 171 s. ISBN 0-521-83345-0.
8. ŠULC, J. *Lasery a jejich aplikace*. [online]. 2002, [cit. 2008-03-22]. Dostupné z World Wide Web: <[www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf](http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf)>.
9. SPOLEK AUTORŮ WIKIPEDIA. *Typy laserů*. [online]. 2008, [cit. 2008-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
10. ŘASA, J., JINDROVÁ, R. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. MM Průmyslové spektrum. ČVUT v Praze: Fakulta strojní, 2006/č.7 rubrika trendy s.34
11. PÁTEK, K. *Lasery, kvantové generátory světla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1964. 171 s.
12. BERKMANN, J, Linde Gas LLC. *Facts about laser technology*. [online]. 2006, [cit. 2008-04-10]. Dostupné z World Wide Web: <<http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl%5B1%5D.%20Drucklayout%2023.06.03.pdf>>.

13. Vrbová M. a kol. *Oborová encyklopedie: Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. 478 s. ISBN 80-85849-56-9
14. KUBÍČEK, J. *Technologie svařování*. [online]. 2001, [cit. 2008-04-25]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.svarak.cz/f/svarak/p/PDF%20články/PDF\\_Česky/Technologie-svarovani-Kubicek.pdf](http://www.svarak.cz/f/svarak/p/PDF%20články/PDF_Česky/Technologie-svarovani-Kubicek.pdf)>.
15. TRUMPF. *Technical information: Laser processing CO<sub>2</sub> laser*. [online]. 2001, [cit. 2008-04-22]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.trumpf.com/3.img-cust/Library\\_Laser\\_Processing\\_CO2-Laser\\_2007-02.PDF](http://www.trumpf.com/3.img-cust/Library_Laser_Processing_CO2-Laser_2007-02.PDF)>.
16. BUCHFINK, G., TRUMPF. *Fascination of sheet metal*. 1st edition. Kammüller, N. (editor), Coleman, R.M. (translate), Germany: 2006. 20 s. ISBN 3-8343-3071-0.
17. JONÁTA, M. AIR PRODUCTS. *Průmyslové lasery a jejich aplikace*. [online]. 2001, [cit. 2008-04-17]. Dostupné z World Wide Web: <[www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery\\_clanek-MJ.pdf](http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf)>.
18. TRUMPF. *Increase productivity in laser cutting with BIFOCAL*. [online]. 2001, [cit. 2008-04-24]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.airliquide.com/file/otherelement/pj/products/welding-boiler/bifocal\\_laser\\_cutting59905.pdf](http://www.airliquide.com/file/otherelement/pj/products/welding-boiler/bifocal_laser_cutting59905.pdf)>.
19. HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika: elektromagnetické vlny-optika-relativita*. Praha: Prometheus 1997, ISBN 80-214-1868-0
20. HITZ, B. EWING, J.J. HECHT, J. *Introduction to laser technology*. 3rd edition. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE PRESS, 2001. 308 s. ISBN 0-7803-5373-0.
21. WANDERA, C. *Laser cutting austenitic stainless steel with a high quality laser beam*. [online]. 2006, [cit. 2008-04-25]. Dostupné z World Wide Web: <<https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/30302/TMP.objres.256.pdf?sequece=1>>.
22. LINDE GAS. *Plyny pro řezání laserem*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-20]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.linde\\_gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind\\_laser2](http://www.linde_gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_laser2)>

23. LASER INSTITUTE OF AMERICA. *LIA: Handbook of Laser Materials Processing*. Ready, J.F.(editor). Farson, D.F(associate editor), 2001. 715 s. ISBN 0-912035-15-3.
24. MRŇA L. *Interní dokumentace firmy Dendera a.s. dále fotografie* [online-elektronická pošta]. 5. dubna 2008 8:45 [cit. 2008-04-7]. Osobní komunikace
25. FÜRBAACHER, J. a kolektiv. *Lexikon technických materiálů*. 1. vyd. Praha: VERLAG DASHÖFER. 2001. ISBN 80-86229-02-5.
26. JULIŠ, M. POSPÍŠILOVÁ, S. *Protokol HSR-7 2006/07 Svařitelné oceli*. Předmět: HSR-Strojírenské materiály a tepelné zpracování ÚMI FSI VUT v Brně.2007 [cit. 2008-04-16].
27. RAUTARUUKKI. *Hot roller steels plates, sheat and coils*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-12]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/C92DEB940033C217C22574260052720A/\\$File/KuVaTe\\_MFI01.102EN\\_01.2008.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/C92DEB940033C217C22574260052720A/$File/KuVaTe_MFI01.102EN_01.2008.pdf?openElement)>.
28. AMADA AMERICA. *Gemini FO-3015NT CNC laser machine user pre-installation guide*. [online] 2007, [cit. 2008-04-12]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.amada.com/support/lasers/gemini/FO-3015NT\\_pre-install.pdf](http://www.amada.com/support/lasers/gemini/FO-3015NT_pre-install.pdf)>.
29. VOESTALPINE. *Alform laser processing*. [online] 2007, [cit. 2008-04-12]. Dostupné z WWW: <[www.voestalpine.com/.../downloads/product\\_brochures.ContentPar.6800.File.tmp/AlformDieVerarbeitung\\_E\\_07.pdf](http://www.voestalpine.com/.../downloads/product_brochures.ContentPar.6800.File.tmp/AlformDieVerarbeitung_E_07.pdf)>.
30. MARSHALL, G.F. *Handbook of Optical and Laser scanning*. Laser Institute of America: 2004. 10-98 s. ISBN 0-8247-5569-3.
31. SCHULTZ, W, D., at al. *Heat conduction losses in laser cutting of materials*. *J. Phys. D: Appl. Phys* 1993. 26 1357.
32. EICHLER, H.J., at al. *Laser physics and Applications part 1*. Weber, H. Herziger, G. Poprawe, R.(editors) Berlin:Springer 2004. 263s. ISBN 3-540-44379-7.
33. Ursu, I., at al. *Journal of Applied Physics:High intensity laser irradiation of metallic surfaces covered by periodic structures*. Moscow: Institut Obshchei Fiziki,1987. ISSN 0021-8979
34. Šob, F. *Hydromechanika*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2002. ISBN 80-214-2037-5

35. TIRUMALA, B.R. NATH, A.K. *Melt flow characteristics in gas-assisted laser cutting* . Centre for Advancet technology India: 2001. 7 s.
36. Norma-ČSN EN ISO 9013 *Tepelné dělení-klasifikace tepelných řezů- Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Český normalizační institut 2003 idt ISO 9013:2002
37. FERONA. *Specifikace výrobku*. [online] 2007, [cit. 2008-03-10]. Dostupné z WWW:  
<<http://62.168.62.45/cze/katalog/detail.php?id=6407>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$\text{Al}_2\text{O}_3$	[-]	oxid hlinitý (umělý korund)
Ar F	[-]	fluorid argonu
BPP	[-]	parametr svazku
$\text{Ca F}_2$	[-]	fluorid vápenatý
$\text{CO}_2$	[-]	oxid uhličitý
CW	[-]	kontinuální režim řezání
DOF	[mm]	hloubka pole
DUV	[-]	hluboké ultrafialové záření
Er:YAG	[-]	Erbium laser
FIR	[-]	vzdálené infračervené záření
Ga-As laser	[-]	galium-arsenový laser
HAZ	[mm]	tepelně ovlivněná zóna
He-Ne laser	[-]	hélium-neonový laser
Ho/CTH:YAG	[-]	holium-erbium-thalium laser
Kr Cl	[-]	chlorid krypto
Nd:YAG	[-]	neodymový laser
NIR	[-]	blízké infračervené záření
PPM	[%]	miliontina čistoty
$\text{TEM}_{mn}$	[-]	transverzální elektromagnetický mod (kartézské souřadnice)
$\text{TEM}_{pl}$	[-]	transverzální elektromagnetický mod (cylindrické souřadnice)
UV	[-]	ultrafialové záření
$\text{Xe F}_2$	[-]	xenon difluorit
$\text{Xe Cl}$	[-]	chlorid xenoný
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	[-]	krystal yttrium-aluminium granát
Zn Se	[-]	zink - selenidu
$A_s$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha svazku v ohnisku
A(T)	[-]	koeficient absorpce
$C_{ekv}$	[-]	uhlíkový ekvivalent
D	[mm]	průměr svazku na výstupu rezonátoru
$D_{\check{c}}$	[mm]	průměr čočky
$E_0$	[eV]	základní energetický stav
$E_1, E_2, E_3, E_4$	[eV]	energetické stavy
$E_{(0,0)}$	[eV]	počáteční elektrické pole v bodě (0,0)
$E_F$	[J]	vnitřní energie fotonu
$E_i$	[V m <sup>-1</sup> ]	elektrická intenzita
$E_m$	[eV]	vyšší energetický stav
$E_{(r,z)}$	[eV]	komplexní elektrické pole amplitudy v prostoru
G	[W <sup>-1</sup> ]	elektrická vodivost (konduktivita)
K	[-]	koeficient kvality svazku
$L_G$	[mm]	délka Gaussova modu
$L_{G'}$	[mm]	délka modu se změnou vodivosti



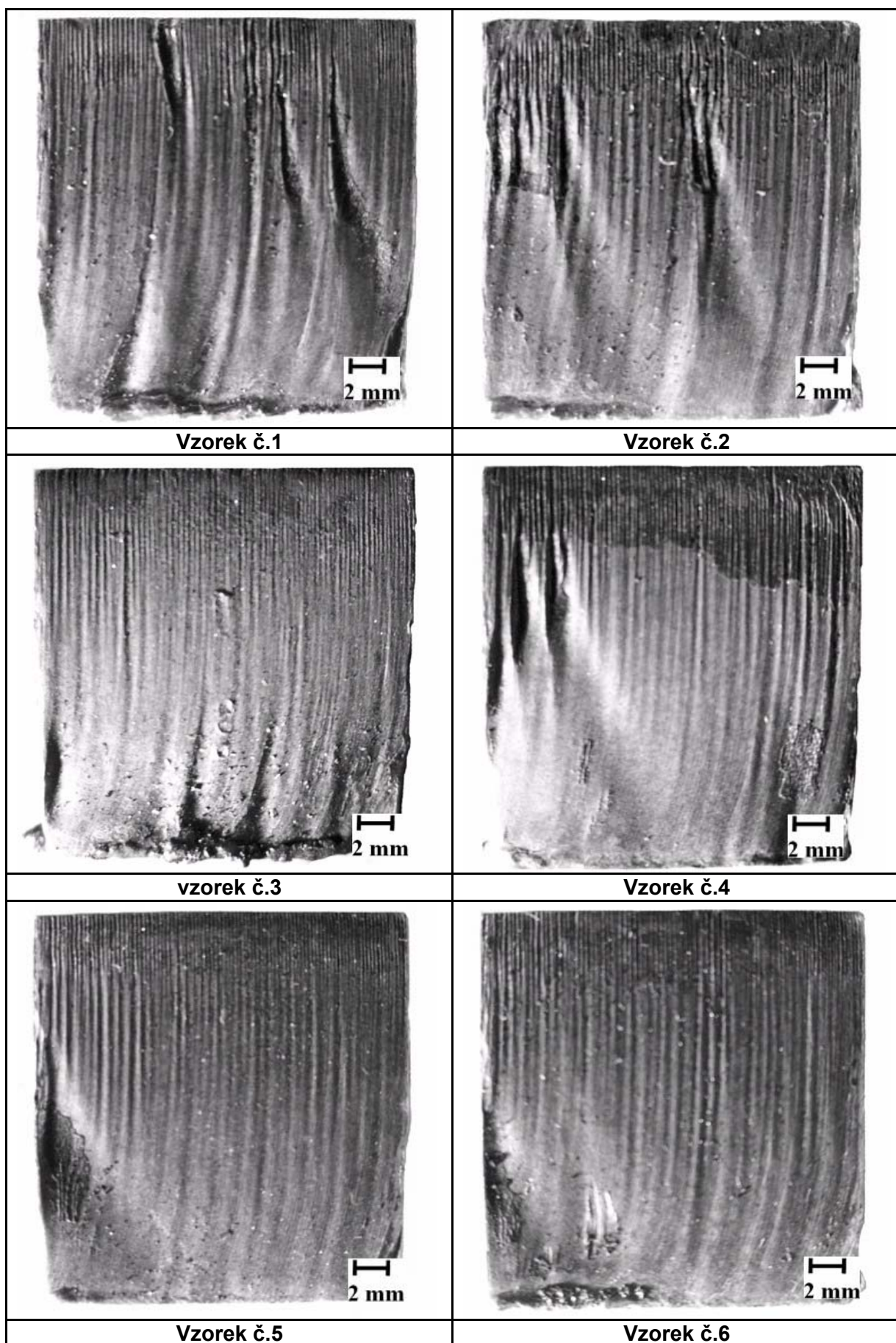
$L_{Ks}$	[mm]	délka jednoho kusu součástky
$L_S$	[mm]	délka směsného modu
$L_T$	[J kg <sup>-1</sup> ]	latentní teplo
$L_z$	[mm]	vzdálenost mezi zrcadly
$M^2$	[-]	míra přenosu svazku
$N$	[-]	Fresnelovo číslo
$N_0$	[-]	počet částic na základní energetické hladině
$N_m$	[-]	počet částic na vyšší energetické hladině
$P$	[W]	výkon laseru
$P_{vAx}$	[ks]	počet kusů varianty A v ose x
$P_{vAy}$	[ks]	počet kusů varianty A v ose y
$P_{vA}$	[ks]	počet kusů varianty A
$P_{vBx}$	[ks]	počet kusů varianty B v ose x
$P_{vBy}$	[ks]	počet kusů varianty B v ose y
$P_{vB}$	[ks]	počet kusů varianty B
$Q$	[J]	vnesené teplo
$Q_N$	[C]	elektrický náboj
$Q_V$	[l hod <sup>-1</sup> ]	objemový průtok plynného média
$R(T)$	[-]	koeficient reflexe
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$R_0$	[Ω m]	měrný elektrický odpor na počátku ohřevu
$R_m(T)$	[Ω m]	elektrický odpor materiálu při teplotě T
$R_{R,S}$	[mm]	šířka stopy svazku
$R_{(z)}$	[mm]	poloměr křivosti vlnoplochy
$Rz_5$	[mm]	průměrná výška nerovností profilu
$S_G$	[mm <sup>2</sup> ]	Gaussova plocha
$S_{pl}$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha interagující části svazku
$T_O$	[°C]	teplota okolí
$T_P$	[°C]	teplota předeřevu
$T_S$	[K]	teplota soustavy
$T(T)$	[-]	Koeficient transmise (prostupu)
$T_V$	[°C]	teplota vypařování materiálu
$V_{SP}$	[mm <sup>3</sup> ]	objem odstraněné části spáry
$V_{SV}$	[mm <sup>2</sup> ]	objem interagující části svazku
$a_T$	[K <sup>-1</sup> ]	teplotní součinitel odporu
$a_z$	[mm]	poloměr zrcadla
$c_0$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla ve vakuu
$c_P$	[J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
$f$	[Hz]	frekvence světla
$f_0$	[-]	Hermitův polynom Gaussova rozložení
$f_2$	[-]	Hermitův polynom TEM01 rozložení
$f_{smes}$	[-]	Hermitův polynom směsného rozložení
$f_z$	[mm]	ohnisková vzdálenost
$g_A$	[mm]	aktivní úsek svazku 1
$g_P$	[mm]	aktivní úsek svazku 2
$h$	[J s]	Planckova konstanta
$h_G$	[mm]	hloubka stopy Gaussova svazku

$h_{G'}$	[mm]	hloubka stopy svazku se změnou vodivosti
$h_s$	[mm]	hloubka stopy svazku smíšeného modu
$h_f$	[mm]	hloubka penetrace do materiálu
$h_{TOO}$	[mm]	hloubka tepelně ovlivněné oblasti
$i$	[-]	imaginární jednotka ( $i^2 = -1$ )
$k$	[J K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta
$k_v$	[m <sup>-1</sup> ]	vlnové číslo
$I_0$	[W m <sup>-2</sup> ]	intenzita v ohnisku svazku
$I_R$	[W m <sup>-2</sup> ]	rozdělení energie napříč svazkem
$I_{(r,z)}$	[W m <sup>-2</sup> ]	intenzita elektrického pole v prostoru
$l_R$	[mm]	řezaná délka
$n$	[mm]	skluz rýhování
$q_{v(x)}$	[W m <sup>-2</sup> ]	tok tepla do materiálu
$r$	[mm]	radiální vzdálenost od osy svazku
$t_{ks}$	[min]	čas řezání jednoho kusu
$t_{SP}$	[mm]	výška řezné spáry
$t_{tab}$	[min]	celkový čas řezu tabule plechu
$u$	[mm]	odchylka kolmosti
$v_c$	[mm min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_f$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost penetrace do materiálu
$v_v$	[m s <sup>-1</sup> ]	výtoková rychlost plynu
$w$	[mm]	rozteč skluzových rýh
$w_0$	[mm]	poloměr svazku v ohnisku
$w_{0 \text{ gauss}}$	[mm]	poloměr svazku v ohnisku Gaussova svazku
$w_{0x}$	[mm]	poloměr odstraněné části spáry
$w_{(z)}$	[mm]	aktuální poloměr svazku
$z$	[mm]	axiální vzdálenost od ohniska svazku
$z_R$	[mm]	Rayleighova délka pasu svazku
$\alpha_{FR}$	[-]	Fresnelův koeficient absorpce
$\alpha_1$	[°]	úhel uzlu intenzity
$\alpha_s$	[K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\epsilon$	[H m <sup>-1</sup> ]	dielektrická permeabilita
$\epsilon_0$	[F m <sup>-1</sup> ]	permitivita vakua
$\phi_E$	[V m]	tok elektrické intenzity
$\eta$	[Ω]	charakteristická impedance
$\lambda$	[μm]	vlnová délka
$\nu$	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita
$\theta_G$	[°]	úhel Gaussova modu
$\theta_{G'}$	[°]	úhel smíšeného modu se změnou vodivosti
$\theta_S$	[°]	úhel smíšeného modu
$\theta_w$	[°]	slon stěny key hole
$\theta_{(z)}$	[°]	divergence laserového svazku
$\sigma$	[Ω <sup>-1</sup> ]	elektrická vodivost
$\tau$	[s]	doba interakce svazku s materiálem
$\psi$	[°]	Brewsterův úhel

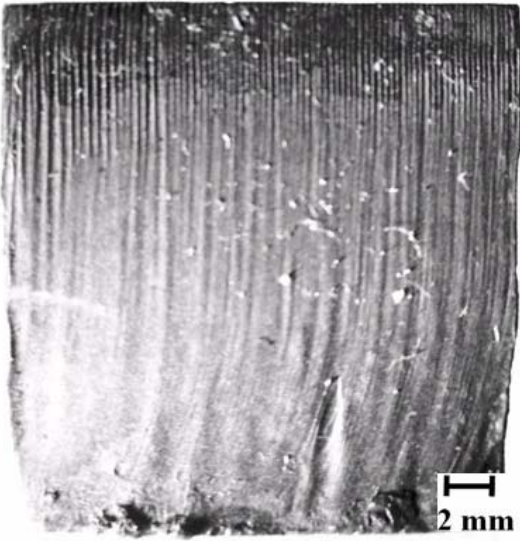
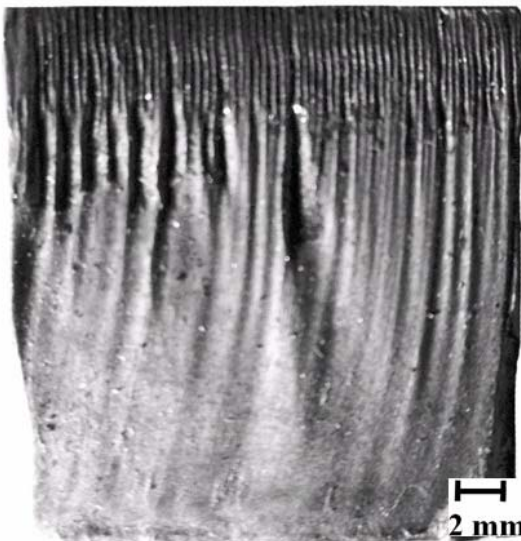
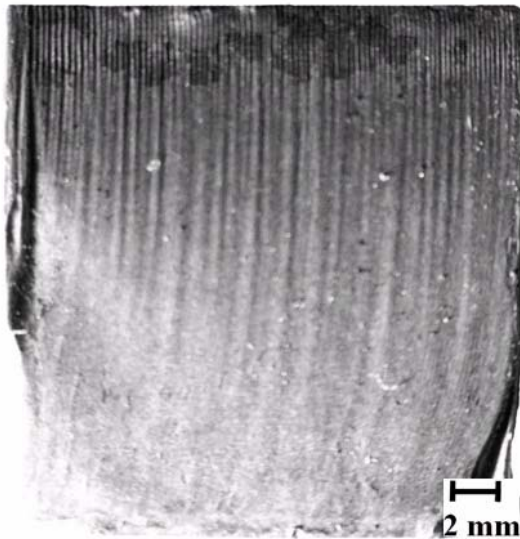
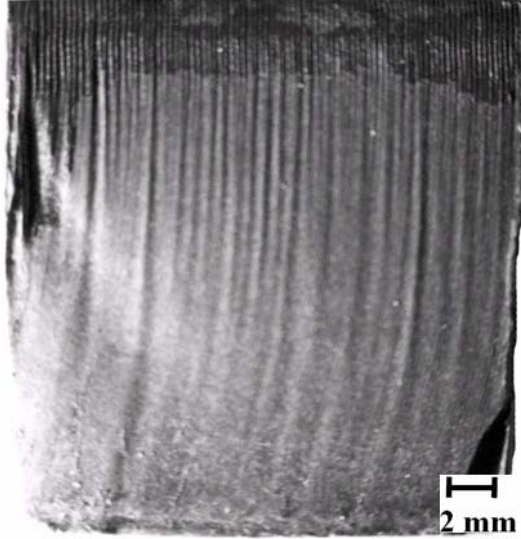
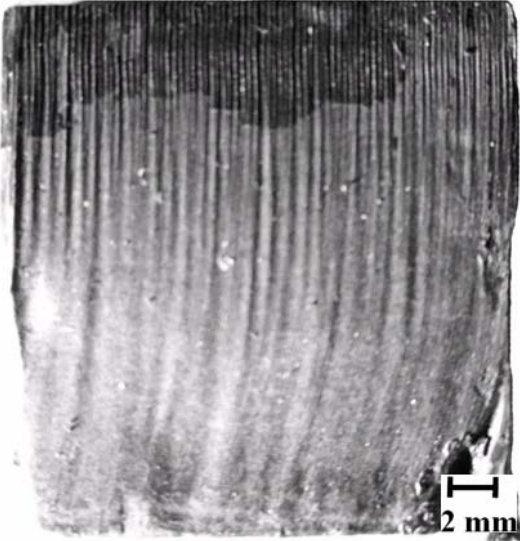
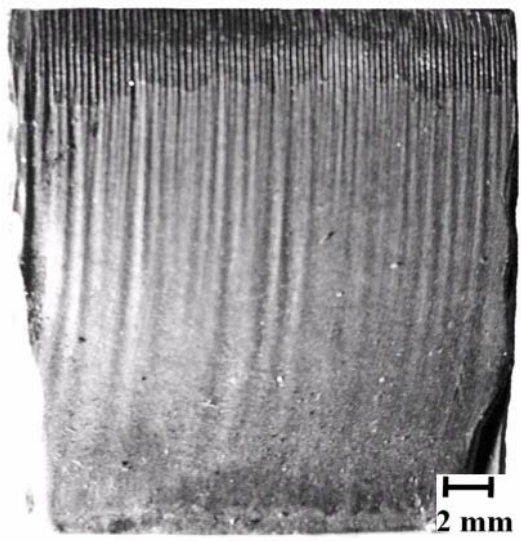
**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Vyhodnocované vzorky č.1-6  
Příloha 2 Vyhodnocované vzorky č. 7-14  
Příloha 3 Vyhodnocované vzorky č. 1J-6J  
Příloha 4 Řezané součásti před vyjmutím z tabule plechu č.1-9  
Příloha 5 Řezané součásti před vyjmutím z tabule plechu č.10-14  
Příloha 6-8 Materiálové listy materiálu Laser Raex 250C

## Příloha 1

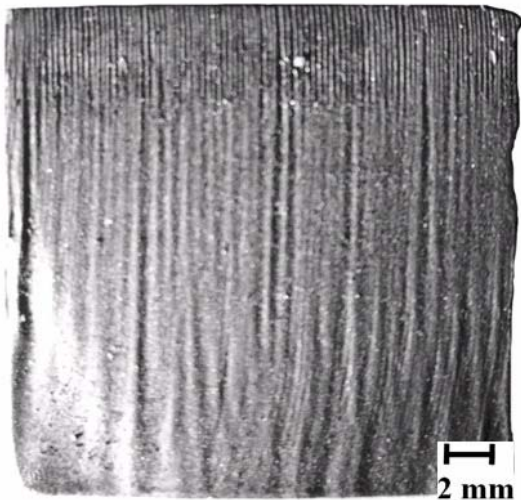
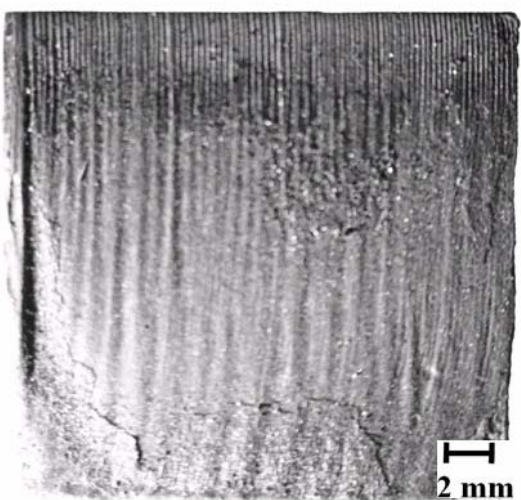
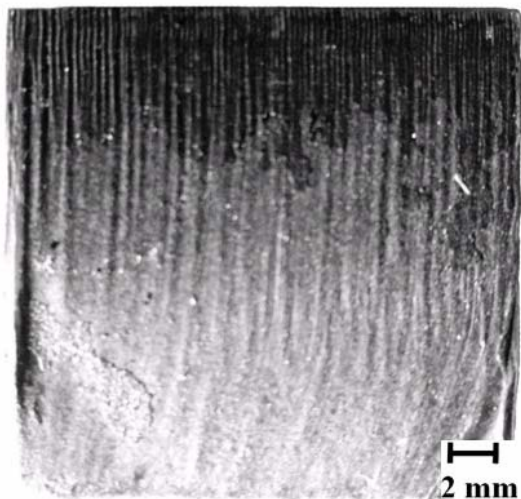
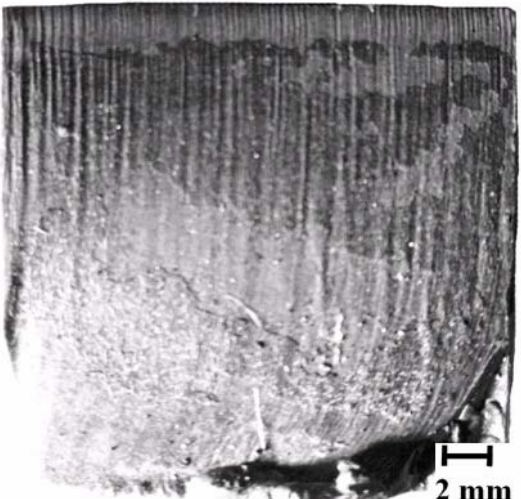
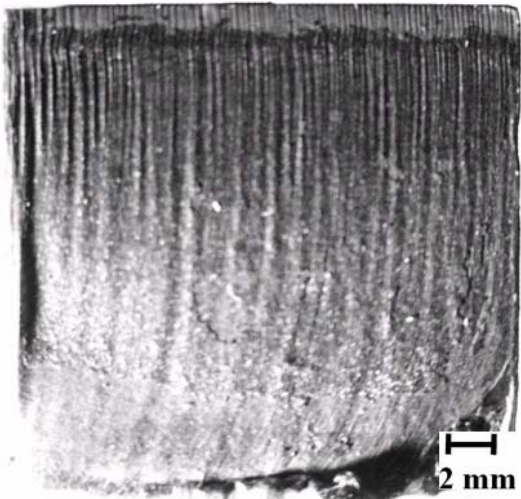
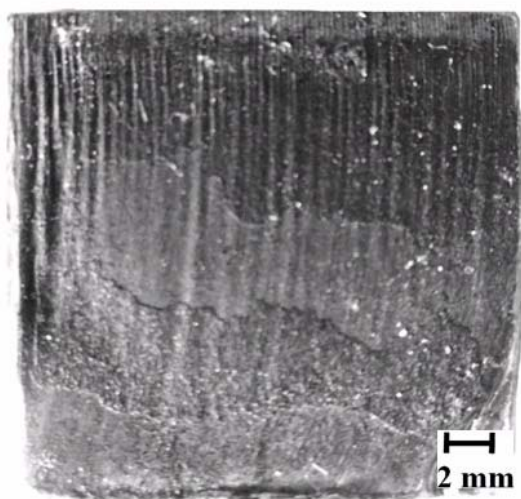


## Příloha 2

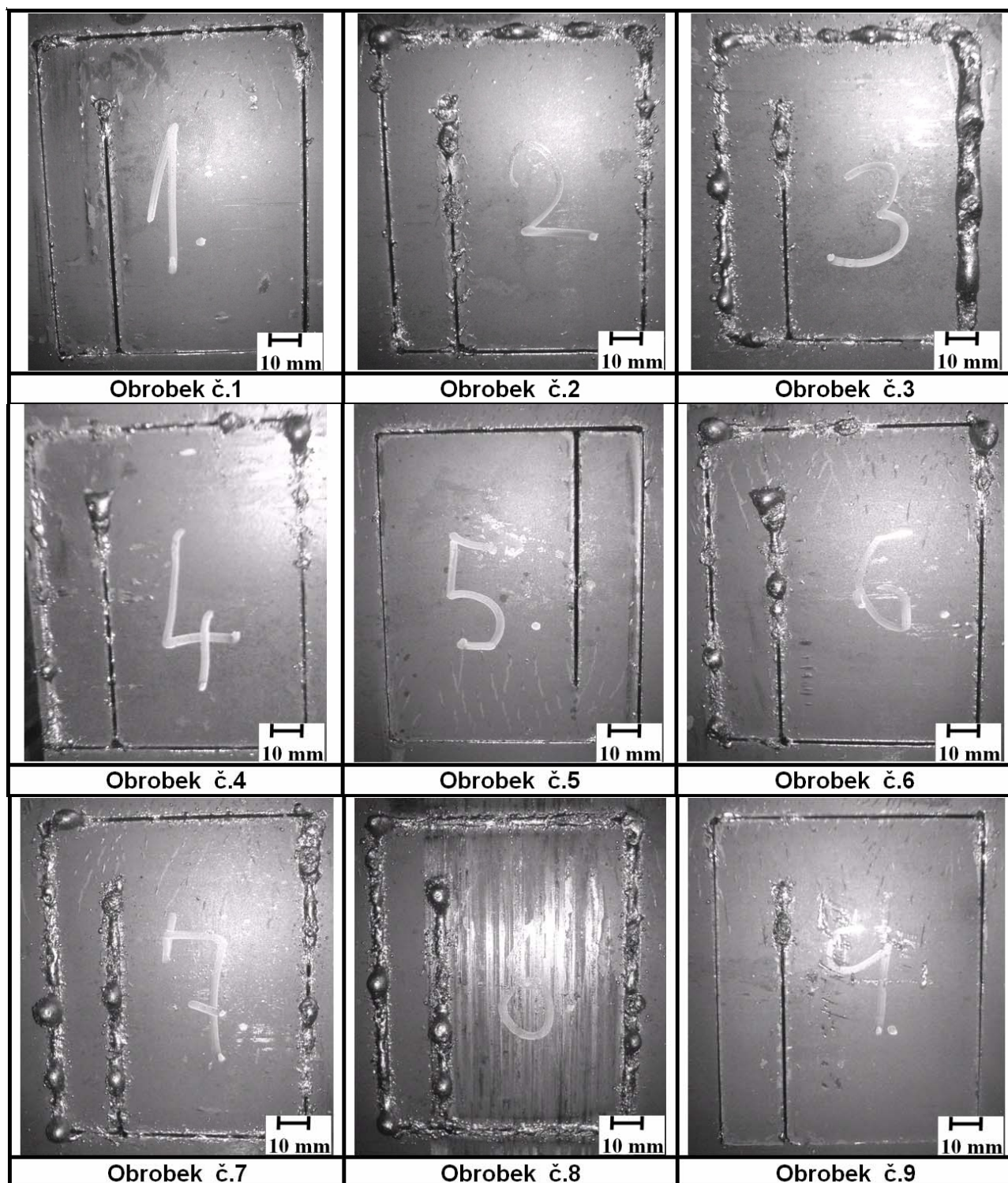
	
Vzorek č.7	Vzorek č.10
	
Vzorek č.11	Vzorek č.12
	
Vzorek č.13	Vzorek č.14



### Příloha 3

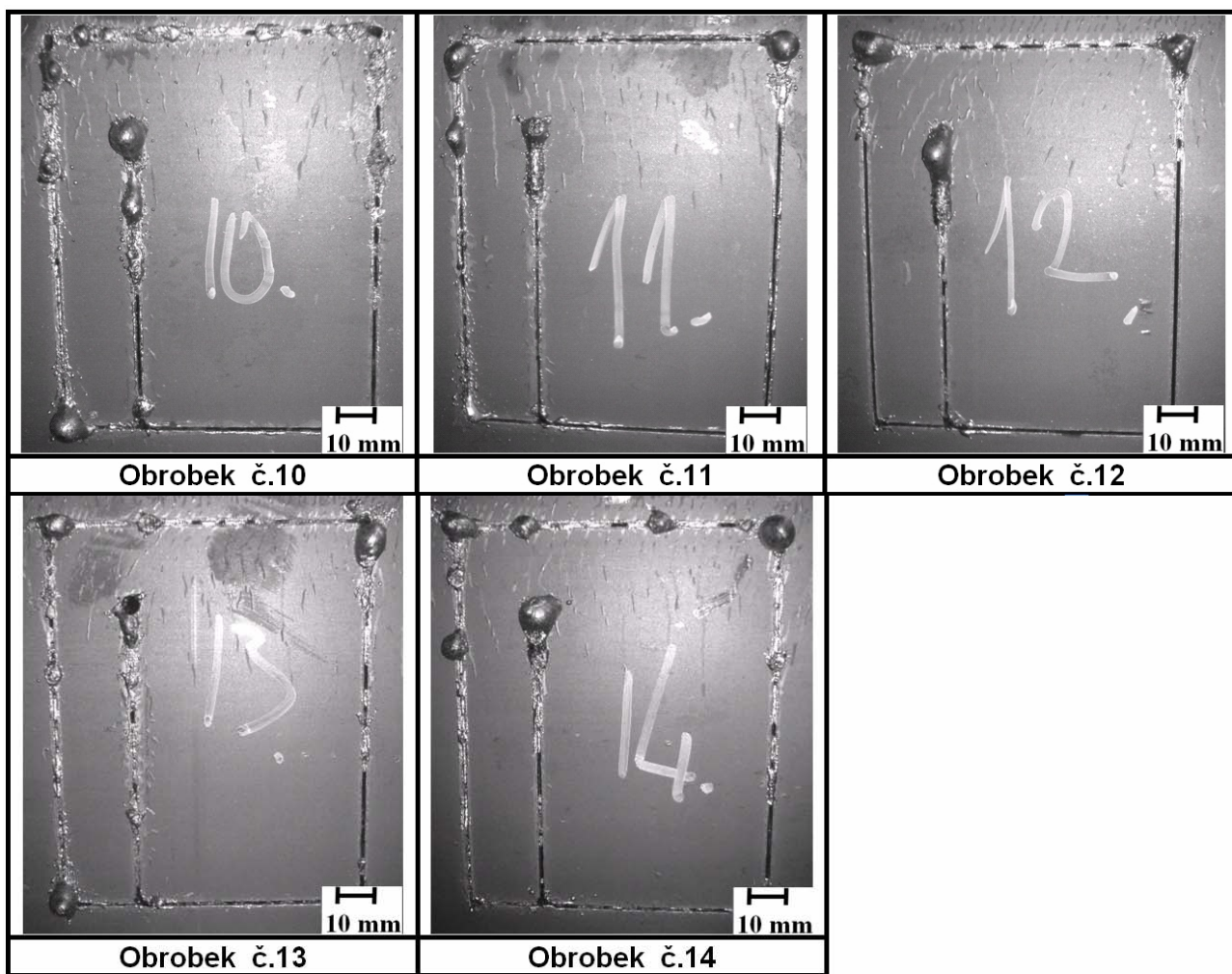
	
Vzorek č.1J	Vzorek č.2J
	
Vzorek č.3J	Vzorek č.4J
	
Vzorek č.5J	Vzorek č.6J

## Příloha 4





## Příloha 5



## Příloha 6

### Specifikace výrobku

**Plech válcovaný za tepla, EN 10029-A-N, rozměr 20x1500x3000**

**Kategorie:** Ploché výrobky

**Norma:** ČSN EN 10029

**značka oceli /  
materiál:** Raex 250 C Laser dle Rautaruukki

**Cena(211720Z) :** 43,87 Kč / kg  
31 016,09 Kč / ks

**hmotnost** 702 kg

Tloušťka	20 mm
Šířka	1500 mm
Délka	3000 mm
Mezní úchylka tloušťky	1,3 mm -0,6 mm
Mezní úchylka délky	20 mm
Mezní úchylka rovinnosti na délku 1000 mm	7 mm
Mezní úchylka rovinnosti na délku 2000 mm	10 mm
Mezní úchylka šířky	20 mm
Úchylka přímosti a pravouhlosti - v každém dodaném plechu musí být možno vepsat obdélník s jmenovitými rozměry (délka, šířka)	

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Ferona, a.s. k zakázce č. 86151, položce č. 2117/20Z, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 35675 na množství 1440 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.







ANALYYSITODISTUS ANALYSIS CERTIFICATE  
ANALYSE SCHEMIGUNG COMPOSITIO CHIMIQUE CERTIFICAT  
СЕРТИФИКАТ АНАЛИЗА

5/6  
A 28956 -001  
05.07.2007

Polymerside Data Datum Data Dna  
05.07.2007

LV

Analytical Chemical composition % Chemisch-Zusammensetzung % Composition Chimique % Аналитический состав											
Element	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol
C	ST	99.8	ST	0.88	0.007	0.005	0.043	0.002	0.005	0.002	0.030
Si	SI	0.01	AL	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Fe	FE	0.001	NI	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Mn	MN	0.001	P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
S	S	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

35675 001 23 0998 01 088 007 005 043 002 005 002 030 003 004

Method	Result	Unit
Chemical	0.01	%
Physical	0.01	%
Chemical	0.01	%
Physical	0.01	%
Chemical	0.01	%
Physical	0.01	%

CECC-C-100/61-CECC-C-100/61/5+ (H1+C1)/15

**RUUKKI PRODUCTION**  
Raahen Steel Works  
Tutkimus ja valvonta  
Testing and Inspection  
Forschung und Kontrolle

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

*M. Valkama*

**MURINA VALKAMA**  
Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot  
Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot  
Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot  
Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot

Yhteystiedot yhteystiedot yhteystiedot